

Trabajo Fin de Máster

Modelización matemática de la producción de biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos

Intensificación: ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS

Autor:

ANTONIO LECUONA FERRANDO

Tutor:

DRA. MARÍA ELENA RODRIGO CLAVERO

Cotutor/es:

DR. JAVIER RODRIGO ILARRI

SEPTIEMBRE, 2019



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Datos del proyecto

Título del TFM en español: MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN VETEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Título del TFM en inglés: MATHEMATICAL MODELING OF BIOGAS PRODUCTION IN URBAN SOLID WASTE LANDFILLS

Título del TFM en Valenciano: MODELITZACIÓ MATEMÀTICA DE LA PRODUCCIÓ DE BIOGÀS EN ABOCADORS DE RESIDUS SÒLIDS URBANS

Alumno: ANTONIO LECUONA FERRANDO

Tutor: DRA. MARÍA ELENA RODRIGO CLAVERO

Cotutor/es:

DR. JAVIER RODRIGO ILARRI

Director experimental:

Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE, 2019

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

Durante la fase de explotación y mantenimiento postclausura de un vertedero de residuos sólidos urbanos, la producción de biogás se plantea como uno de los problemas medioambientalmente más relevantes. El gas de vertedero (conformado principalmente por una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero) se produce a partir de la descomposición en fase anaerobia de la materia orgánica presente en los residuos depositados en el vaso.

En este TFM se van a identificar y describir los procesos de formación de biogás en vertederos de RSU y los modelos disponibles para la evaluación de la producción de biogás.

Se escogerán dos de los modelos habitualmente utilizados y se compararán los resultados obtenidos al aplicarlos para evaluar la producción de biogás en un vertedero sintético basado en datos reales similares a los correspondientes a las características de los vertederos de RSU de la Comunidad Valenciana.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

Durant la fase d'explotació i manteniment *postclausura d'un abocador de residus sòlids urbans, la producció de biogàs es planteja com un dels problemes mediambientalment més rellevants. El gas d'abocador (conformat principalment per una mescla de metà, diòxid de carboni i altres gasos d'efecte d'hivernacle) es produeix a partir de la descomposició en fase anaeròbia de la matèria orgànica present en els residus depositats en el got.

En aquest TFM s'identificaran i descriure els processos de formació de biogàs en abocadors de RSU i els models disponibles per a l'avaluació de la producció de biogàs.

Es triaran dos dels models habitualment utilitzats i es compararan els resultats obtinguts en aplicar-los per a avaluar la producció de biogàs en un abocador sintètic basat en dades reals similars als corresponents a les característiques dels abocadors de RSU de la Comunitat Valenciana.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

During the municipal solid waste (MSW) landfill operational and post-closure phases, the biogas production is considered to be one of the most important environmental problems. Landfill gas (consisting mainly of a mixture of methane, carbon dioxide and other greenhouse gases) is produced from the anaerobic decomposition of the organic matter present in the waste deposited in the landfill.

In this Ms Thesis, the biogas production processes in MSW landfills and the numerical models available for the evaluation of biogas production will be identified and described.

Two of the most commonly used models will be chosen and results obtained will be compared when applying them to evaluate the production of biogas in a synthetic landfill based on real data similar to those corresponding to the characteristics of the MSW landfills in the Valencia Region.

Palabras clave español (máximo 5): Modelo matemático, vertedero, biogás, residuos

Palabras clave valenciano (máximo 5): Model matemàtic, abocador, biogàs, residus

Palabras clave inglés (máximo 5): Mathematical model, landfill, biogas, waste

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN. LOS RSU Y SU PROBLEMÁTICA. EL VERTEDERO COMO TÉCNICA DE ELIMINACIÓN.....	1
2. LEGISLACIÓN VIGENTE. EL REAL DECRETO 1481/2001	3
3. ESTADO DEL ARTE.....	9
3.1. Introducción	9
3.2. Generación del gas.....	9
3.2.1. Fase I. Ajuste inicial	10
3.2.2. Fase II. Fase de transición	10
3.2.3. Fase III. Fase ácida	11
3.2.4. Fase IV. Fase de fermentación del metano	12
3.2.5. Fase V. Fase de maduración	12
3.3. Duración de las fases	12
3.4. Modelos disponibles para la evaluación de la producción de biogás	13
3.4.1. Orden cero	13
3.4.2. Orden uno	14
3.4.3. Modelo de degradación completa de la materia orgánica	21
3.4.4. LandGEM	23
4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE DESCOMPOSICIÓN COMPLETA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RSU.....	25
5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO LANDGEM.....	29
5.1. Introducción	29
5.2. Estructura del modelo	29
5.3. Ecuaciones consideradas	31
5.4. Datos de entrada y de salida	31
5.4.1. Introducción de las características del vertedero.....	31
5.4.2. Determinación de los parámetros del modelo	32
5.4.2.1. Ratio de generación de metano (k)	33
5.4.2.2. Capacidad potencial de generación de metano (L_0)	34
5.4.2.3. Concentración de compuestos orgánicos sin metano (NMOC)	34
5.4.2.4. Contenido de metano.....	35
5.4.3. Selección de gases/contaminantes	36

Índice

5.4.4. Entrada de los datos de aceptación de residuos	38
5.4.5. "Printing Inputs"	40
5.4.6. Visualización e impresión de los datos tabulados	41
5.4.7. Visualización e impresión gráfica de los resultados.....	42
5.4.8. Visualización e impresión del inventario de resultados	43
5.4.9. Visualización e impresión del informe resumido	43
6. APLICACIÓN COMPARADA DE LANDGEM Y EL MODELO DE DEGRADACIÓN COMPLETA	45
6.1. Datos de partida.....	46
6.2. Aplicación del método clásico	48
6.3. Aplicación del método LandGEM.....	50
6.4. Análisis de sensibilidad de parámetros	53
7. CONCLUSIONES.....	61
9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	65
10. REFERENCIAS	67

Anexo I – Método de degradación completa

Anexo II - LandGEM

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Fases generales en la generación de gases de vertedero	10
Figura 3.2. Representación gráfica de la producción de gas durante un período de 10 años	22
Figura 3.3. Efecto de un contenido de humedad reducido	23
Figura 4.1. Parte RBD de los residuos de jardín	26
Figura 4.2. Parte LBD de los residuos de jardín	26
Figura 4.3. Biogás generado por cada 100 kg de RBD	27
Figura 4.4. Biogás generado por cada kilogramo de RBD	27
Figura 4.5. Biogás generado por cada 100 kg de LBD	27
Figura 4.6. Biogás generado por cada kilogramo de LBD	27
Figura 5.1. Hoja de trabajo “User Inputs”	32
Figura 5.2. Determinación de los parámetros del modelo.....	33
Figura 5.3. Selección o adición de los gases/contaminantes	38
Figura 5.4. “Input review”	40
Figura 5.5. “Results”	41
Figura 5.6. Gráfica de las emisiones estimadas (toneladas/año).....	42
Figura 5.7. Inventario de resultados para un año en concreto	43
Figura 6.1. Zonas X, XI y XIII	45
Figura 6.2. Residuos gestionados año horizonte (2025)	46
Figura 6.3. Biogás producido por la fracción RBD	49
Figura 6.4. Biogás producido por la fracción LBD.....	49
Figura 6.5. Producción de biogás.....	50
Figura 6.6. Años de apertura y clausura del vertedero	51
Figura 6.7. Selección de los gases.....	52
Figura 6.8. Parámetros CAA Zona Árida	52
Figura 6.9. Biogás obtenido con los parámetros CAA Zona Árida.....	53
Figura 6.10. Escenario 1.....	54
Figura 6.11. Escenario 2.....	54
Figura 6.12. Escenario 3.....	55
Figura 6.13. Escenario 4.....	55
Figura 6.14. Escenario 5.....	56

Figura 6.15. Escenario 6.....	56
Figura 6.16. Escenario 7.....	57
Figura 6.17. Escenario 8.....	57
Figura 6.18. Escenario 9.....	58
Figura 6.19. Escenarios	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Control de gases. Frecuencia toma de muestras y análisis	6
Tabla 3.1. Modelos disponibles	20
Tabla 3.2. Constituyentes orgánicos rápida y lentamente biodegradables en los RSU .	21
Tabla 4.1. Composición de los residuos	25
Tabla 4.2. Composición de los residuos RBD.....	26
Tabla 4.3. Composición de los residuos LBD	27
Tabla 4.4. Tiempo de descomposición de los residuos	28
Tabla 4.5. Cantidad de residuos depositados en el vertedero al año	28
Tabla 5.1. Nombre y función de las diferentes hojas de trabajo que forman LandGEM30	
Tabla 5.2. Ratio de generación de metano (k)	34
Tabla 5.3. Capacidad potencial de generación de metano (L_0).....	34
Tabla 5.4. Listado de gases y contaminantes	36
Tabla 5.4. Listado de gases y contaminantes (cont.)	37
Tabla 5.5. Tasas de aceptación de residuos	38
Tabla 5.6. Suposiciones respectivas a las tasas de aceptación de residuos.....	39
Tabla 6.1. Cantidades anuales de RSU (toneladas)	47
Tabla 6.2. Composición de los RSU.....	47
Tabla 6.3. Composición química de los RSU	48
Tabla 6.4. Composición de los residuos en la hoja Excel	48
Tabla 6.5. Composición química de la fracción RBD en la hoja Excel	49
Tabla 6.6. Coeficientes de la ecuación estequiométrica de la fracción RBD.....	49
Tabla 6.7. Coeficientes de la ecuación estequiométrica de la fracción LBD	49
Tabla 6.8. Cantidades anuales de RSU.....	51
Tabla 6.9. Escenarios	53
Tabla 7.1. Conclusiones	62

1. INTRODUCCIÓN. LOS RSU Y SU PROBLEMÁTICA. EL VERTEDERO COMO TÉCNICA DE ELIMINACIÓN

Desde el inicio de la civilización los seres humanos han generado residuos como consecuencia del desarrollo de sus actividades. Conforme la población iba aumentando y comenzaba a concentrarse en núcleos urbanos, la cantidad de residuos se incrementaba. Por otro lado, el desarrollo tecnológico de la civilización también ha ocasionado un aumento de la producción de residuos.

Para abordar este problema de forma medioambientalmente sostenible surge el concepto de “gestión integral de residuos”. Uno de los métodos de gestión más empleados en la actualidad y que constituye el destino final de los residuos que no pueden ser aprovechados es el depósito en vertederos. En los vertederos controlados se vierten los residuos generados por la población que se considera que no poseen ningún tipo de valor, ya que existen ciertos tipos de residuos que, por sus características, pueden ser reutilizables. Los vertederos se emplean como una solución a los problemas ambientales y sanitarios que pueden producir los residuos si no son tratados con la atención y el cuidado que requieren. Según Wells *et al.* (1987):

“los vertederos son importantes proyectos constructivos que deben ser convenientemente situados, diseñados, contruidos, explotados, sellados y clausurados. Hoy en día son contruidos y explotados siguiendo criterios científicos e ingenieriles, atendiendo especialmente al impacto social y medioambiental.”

Los residuos depositados en vertederos pueden generar lixiviados y gases nocivos para el medioambiente y la salud pública. Este es el caso de los vertederos de residuos sólidos urbanos, los cuales contienen residuos con alto contenido en materia orgánica biodegradable, contenida en su mayor parte en los restos de comida y residuos de limpieza de parques y jardines. La generación de lixiviados y biogás, junto con la estabilidad de taludes de residuos y las molestias generadas a la población cercana son los problemas ambientales más importantes de los vertederos de residuos sólidos urbanos.

El lixiviado es el fluido generado por la suma de la pérdida de humedad propia de los residuos y de la precipitación que percola a través de ellos, y que puede infiltrarse en el terreno ocasionando la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. En el caso en que el fondo de vaso esté correctamente impermeabilizado, los lixiviados se acumulan en el mismo y deben ser extraídos para evitar que la masa de residuos se sature, lo cual induce la generación de biogás en fase anaerobia y puede comprometer la estabilidad de los taludes del vaso.

Simultáneamente a la formación de lixiviados, la materia orgánica presente en el vertedero genera gases durante su descomposición. El biogás, o gas de vertedero, está conformado por la mezcla de gases generada por el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica presente en la mezcla de residuos. Este biogás puede producir importantes problemas en el medioambiente al inducir emisiones de gases efecto invernadero y en la población cercana a la ubicación del vertedero al producir olores muy molestos.

Por tanto, desde el punto de vista de la protección medioambiental no es suficiente garantizar que la construcción del vertedero se realiza de forma correcta, según lo especificado en la legislación vigente. Es necesario que los vertederos se diseñen, construyan y gestionen bajo una serie de parámetros que tengan en cuenta la peligrosidad que puede conllevar una incorrecta gestión de los residuos que se van a almacenar en los mismos.

En este marco de trabajo, el presente TFM se centra en la utilización de modelos matemáticos para predecir la producción de biogás procedente de los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU). En este documento se analizan dos modelos para estimar la producción de biogás. Uno de ellos se ha implementado en una Hoja Excel y permite evaluar la producción de biogás a través del método convencional, basado en la ecuación de degradación total de la fracción orgánica de los residuos en condiciones óptimas. Este método es utilizado habitualmente en los proyectos técnicos de diseño y operación de vertederos de RSU en la Comunitat Valenciana. El segundo modelo analizado es el modelo LandGEM, una herramienta proporcionada por la *“United States Environmental Protection Agency” (USEPA)*.

El objetivo principal del TFM es realizar un análisis comparado de los resultados obtenidos por ambos modelos, comprobando si arrojan resultados similares al estimar la producción de biogás procedente de la biodegradación de la fracción orgánica contenida en los vertederos de residuos sólidos urbanos, identificando sus correspondientes ventajas y desventajas. Para ello, se realiza una descripción detallada de los mismos y se realiza su aplicación al caso del futuro vertedero de Llanera de Ranes.

2. LEGISLACIÓN VIGENTE. EL REAL DECRETO 1481/2001

Actualmente en España, el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero es la única legislación vigente en lo que se refiere al diseño y gestión de vertederos.

El Real Decreto 1481/2001 es una adaptación de la Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos, la cual establece un régimen concreto para la eliminación de los residuos mediante su depósito en vertederos. Las bases principales que establece esta legislación son la clasificación de los vertederos, la definición de los tipos de residuos aceptables en cada una de ellas, los requisitos técnicos exigibles a estas instalaciones de gestión, la obligación de controlar los vertederos después tras su vida útil y una nueva estructura e imputación de los costes de las actividades de vertido de residuos.

De acuerdo con la Directiva 1999/31/CE, los vertederos deberán incluirse en alguna de las siguientes categorías: (i) vertederos de residuos peligrosos, (ii) vertederos de residuos no peligrosos y (iii) vertederos de residuos inertes. La Directiva recoge la tipología de los residuos que puede recoger cada tipo de vertedero, suprimiendo la entrada de ciertos residuos en los mismos. Por otro lado, las categorías citadas anteriormente deberán emplearse en todo el territorio nacional, obviando así las diferentes clasificaciones que pueden realizar las Comunidades Autónomas.

El Real Decreto 1481/2001 se estructura en 16 artículos, dos disposiciones adicionales, tres disposiciones finales y tres anexos. El presente Real Decreto persigue implantar una correcta gestión y explotación de los vertederos, regulando las características de los mismos. Lo que se pretende con el mismo es proporcionar unas bases técnicas y jurídicas que consigan desarrollar, de una manera correcta, las actividades de eliminación de residuos a través del uso de vertederos.

Las siguientes definiciones se encuentran recogidas en el Real Decreto analizado:

- a) ***“Residuos no peligrosos:*** los residuos que no están incluidos en la definición del artículo 3, párrafo c), de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos.”
- b) ***“Residuos inertes:*** aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes de los residuos y la ecotoxicidad del

lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas.”

- c) “**Residuos biodegradables:** todos los residuos que, en condiciones de vertido, pueden descomponerse de forma aerobia o anaerobia, tales como residuos de alimentos y de jardín, el papel y el cartón.”*
- d) “**Residuos líquidos:** los residuos en forma líquida, incluidas las aguas residuales pero excluidos los lodos.”*
- e) “**Tratamiento previo:** los procesos físicos, térmicos, químicos o biológicos, incluida la clasificación, que cambian las características de los residuos para reducir su volumen o su peligrosidad, facilitar su manipulación o incrementar su valorización.”*
- f) “**Autoridades competentes:** las designadas por las Comunidades Autónomas en cuyo ámbito territorial se ubique el vertedero.”*
- g) “**Solicitante:** la persona física o jurídica que solicita una autorización para establecer un vertedero con arreglo al presente Real Decreto.”*
- h) “**Entidad explotadora:** la persona física o jurídica responsable de la gestión de un vertedero, según la legislación española. Dicha persona puede cambiar de la fase de preparación a la de mantenimiento posterior al cierre.”*
- i) “**Poseedor:** el productor de los residuos o la persona física o jurídica que los tengo en su poder.”*
- j) “**Almacenamiento:** el depósito, temporal y previo a la valorización o eliminación, de residuos distintos de los peligrosos por tiempo inferior a un año cuando su destino final sea la eliminación o a dos años cuando su destino final sea la valorización, así como el depósito temporal de residuos peligrosos durante menos de seis meses. No se incluye en este concepto el depósito de residuos en las instalaciones de producción con los mismos fines y por períodos de tiempo inferiores a los señalados en el párrafo anterior.”*
- k) “**Vertedero:** instalación de eliminación de residuos mediante su depósito subterráneo o en la superficie, por períodos de tiempo superiores a los recogidos en el párrafo j) anterior. Se incluyen en este concepto las instalaciones internas de eliminación de residuos, es decir, los vertederos en que un productor elimina sus residuos en el lugar donde se producen. No se incluyen las instalaciones en las cuales se descargan los residuos para su preparación con vistas a su transporte posterior a otro lugar para su valorización, tratamiento o eliminación.”*

- l) **“Depósito subterráneo:** una instalación para la eliminación de residuos mediante almacenamiento permanente, ubicada en una cavidad subterránea de origen natural o artificial.”
- m) **“Lixiviado:** cualquier líquido que percole a través de los residuos depositados y que rezume desde o esté contenido en un vertedero.”
- n) **“Gases de vertedero:** todos los gases que se generen a partir de los residuos vertidos.”
- o) **“Eluato:** la solución obtenida por medio de una prueba de lixiviación en laboratorio.”
- p) **“Población aislada:** aquella en la que concurren las dos circunstancias siguientes:”
 - 1. “Tener, como máximo, 500 habitantes de derecho por municipio o población y una densidad de cinco habitantes por kilómetro cuadrado.”
 - 2. “No tener una aglomeración urbana con una densidad mayor o igual de 250 habitantes por kilómetro cuadrado a una distancia menor de 50 kilómetros, o tener una comunicación difícil por carretera hasta estas aglomeraciones más próximas debido a condiciones meteorológicas desfavorables durante una parte importante del año.”

Hasta el momento, sólo es posible encontrar una definición legal de lo que son los “gases de vertedero” en el apartado n) del artículo 2 del Real Decreto 1481/2001. Más adelante se proporcionan otras definiciones, que completan a la definición legal.

El Real Decreto 1481/2001 únicamente menciona la gestión de biogás en el Anexo I, apartado 4 “Control de gases”, que dice lo siguiente:

- 1. “Se tomarán las medidas adecuadas para controlar la acumulación y la emisión de gases de vertedero.”
- 2. “En todos los vertederos que reciban residuos biodegradables se recogerán los gases de vertedero, se tratarán y se aprovecharán. Si el gas recogido no puede aprovecharse para producir energía, se deberá quemar.”
- 3. “La recogida, tratamiento y aprovechamiento de gases de vertedero se llevará a cabo de forma tal que se reduzca al mínimo el daño o deterioro del medio ambiente y el riesgo para la salud humana.”

En el Anexo III, apartado 3 “*Datos de emisión: control de aguas, lixiviados y gases*” se describe el control de lixiviados y gases de manera conjunta. Dado que este Trabajo Final de Máster se centra en la producción y gestión del biogás, las partes del Anexo III, apartado 3, que hablan sobre el control de los lixiviados no serán nombradas en el presente trabajo.

En cuanto a gestión de gases se dice lo siguiente:

“El control de gases deberá ser representativo de cada sección del vertedero. En aquellos vertederos en que no se proceda al aprovechamiento energético de los gases, su control se realizará en los puntos de emisión o quema de dichos gases.”

“La frecuencia de la toma de muestras y análisis figura en el cuadro que se ofrece a continuación”:

Tabla 2.1. Control de gases. Frecuencia toma de muestras y análisis

	FASE DE EXPLOTACIÓN	FASE DE MANTENIMIENTO POSTERIOR (1)
EMISIONES POTENCIALES DE GAS Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (CH₄, O₂, CO₂,...) (4)	Mensualmente (3) y (5)	Cada seis meses (6)

Fuente: Real Decreto 1481/2001

(3) “Si la evaluación de los datos indica que mayores intervalos son igualmente efectivos, los mismos podrán adaptarse.”

(4) “Estas mediciones se refieren principalmente al contenido de materia orgánica en el residuo.”

(5) “CH₄, CO₂, O₂ periódicamente; otros gases, según proceda, conforme la composición de los residuos depositados para reflejar sus propiedades de lixiviabilidad.”

(6) “Deberá comprobarse periódicamente la eficacia del sistema de extracción de gases.”

Como puede verse, el Real Decreto 1481/2001 no desarrolla en ninguna de sus partes una metodología que permita cuantificar la producción de biogás. Únicamente exige la recogida y gestión de biogás durante las fases de explotación y post-clausura.

En el año 2003, la Subdirección General de Calidad Ambiental, del Ministerio de Medio Ambiente, crea el documento “*Desarrollo técnico del Real Decreto 1481/2001 (Anexos I y III). Rv. 07 Documento de Trabajo*”, que propone una serie de criterios técnicos, para aquellas Comunidades Autónomas que carezcan de una legislación específica, en lo que se refiere a criterios de diseño y operación de vertederos. Cabe resaltar que dicho documento no es una norma de obligado cumplimiento.

Este documento consta de dos partes independientes que hacen referencia al Anexo I y al Anexo III del Real Decreto 1481/2001. Todo lo referente a la gestión del biogás puede encontrarse en los siguientes apartados:

- *“Desarrollo del Anexo I. Requisitos generales de ubicación, diseño, construcción y operación que deberán cumplir los vertederos de residuos.”*
 - *“Apartado 10. Control de gases”*
- *“Desarrollo del Anexo III. Procedimientos de control y vigilancia en las fases de explotación y de posterior mantenimiento.”*
 - *“Apartado 2. Requisitos de la red de vigilancia y control”*
 - *“Datos de emisión: gases”*

Pese al grado de detalle que alcanza el documento, es imposible encontrar en el mismo una metodología que describa como proceder al cálculo de la generación de biogás.

Por otra parte, el apartado 10 del Anexo I *“Control de gases”*, dice lo siguiente:

“Todos aquellos vertederos que reciban residuos biodegradables, en un porcentaje significativo (por ejemplo, más del 15% de los residuos vertidos) o que emitan gases en una cantidad significativa dispondrán de un sistema de recogida de gases, tratamiento y aprovechamiento. Si no se puede aprovechar se quemará. Se minimizarán los potenciales impactos de esta operación. En el diseño de la cobertura se justificará que el sistema de control garantiza la adecuada protección, no provocando levantamientos ni inestabilidades en el sellado.”

“Se evitará la acumulación de gases mediante los pertinentes puntos de evacuación durante la explotación del vertedero y la fase postclausura.”

“El sistema de cobertura para extracción de gases se podrá potenciar mediante una red activa de pozos de captación de gas que garantice su total eliminación.”

“En este caso será imprescindible el análisis de la situación una vez se pare la red de pozos, de modo que se garantice que no se producirán levantamientos en la cobertura por acumulación de gases remanentes o generados con posterioridad, o bien de inestabilidad en los taludes. Se puede plantear un sistema mixto debidamente aislado, en el que una vez explotada la red de pozos exista una capa de drenaje de gases que evite el efecto descrito.”

“Para el diseño del sistema de control de gas del vertedero se deberá:”

- *“Proceder a un sellado efectivo de las zonas de producción y gestión de gas”*

- *“Manejar la tasa más alta de flujo de gas prevista para el vertedero”*
- *“Estimar la variabilidad en la producción de gas, composición y otros factores”*
- *“Extender tanto como pudiera necesitarse los colectores de gas, pensando en futuras celdas”*

Como se puede comprobar, el Real Decreto descrito en este apartado comenta de una forma bastante breve qué es el biogás, cómo se produce y de qué manera puede gestionarse en los vertederos de residuos sólidos urbanos. Gracias al desarrollo técnico del Real Decreto 1481/2001 es posible tener una idea más clara de cómo gestionar el biogás, ya que profundiza un poco más en el tema que el Real Decreto. Sin embargo, ni en el Real Decreto ni en su desarrollo técnico es posible encontrar una metodología para calcular la cantidad de biogás generada en los vertederos y tampoco una serie de criterios técnicos para el diseño de vertederos.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Introducción

Uno de los principales problemas en la gestión de vertederos son los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica que forma parte de los residuos depositados en el vaso de vertido. Estos gases pueden producir unos efectos no deseados en la atmósfera y en los alrededores de la localización del vertedero. Por ello existen una serie de sistemas de control que permiten evitar los movimientos indeseables de los gases, bien hacia la atmósfera o bien el desplazamiento lateral y vertical a través del suelo circundante. Además, el biogás generado en el vertedero se puede recuperar para generar energía o se puede quemar, bajo condiciones controladas, para disminuir la emisión de compuestos dañinos a la atmósfera.

El biogás de vertedero está formado por gases presentes en grandes cantidades (gases principales) y por otros que se encuentran en pequeñas cantidades (oligogases). Los gases principales proceden de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos. Por otro lado, aunque los oligogases se encuentren presentes en pequeñas cantidades, no por ello poseen una importancia menor, ya que pueden ser tóxicos y presentar una amenaza para la salud pública.

Los gases principales están compuestos por amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2).

Parte de la información que se presenta a continuación ha sido extraída del libro *"Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues"*, escrito por George Tchobanoglous, Hilary Theisen y Samuel A. Vigil.

3.2. Generación del gas

La generación de gas se produce en cinco fases secuenciales que se presentan a continuación.

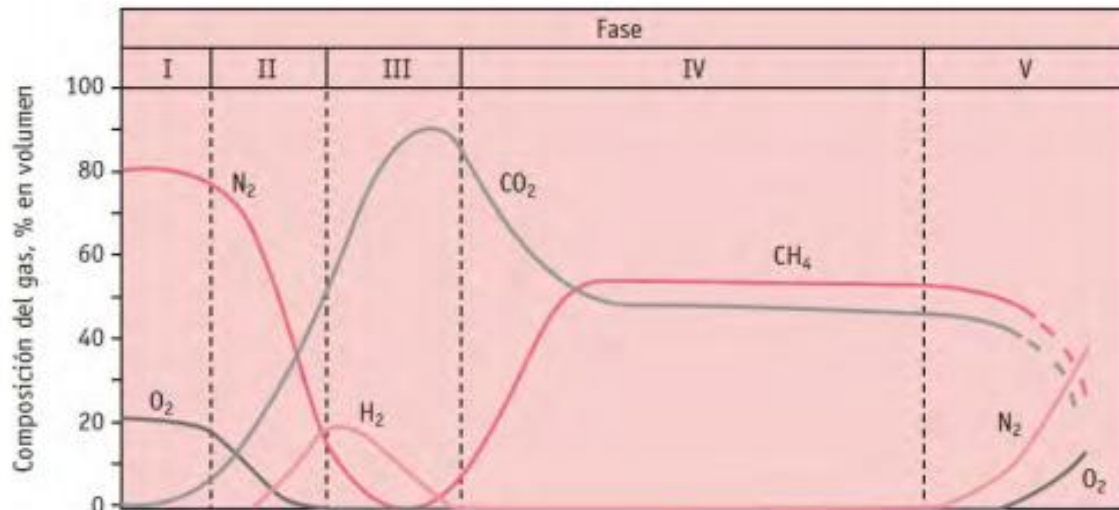


Figura 3.1. Fases generales en la generación de gases de vertedero

Fuente: Carreras y Dorronsoro, 2006

3.2.1. Fase I. Ajuste inicial

Es la fase en la que los residuos sufren una descomposición microbiana, bajo unas condiciones aerobias, durante su colocación en el vertedero y poco después. Se dice que la descomposición se produce bajo unas condiciones aerobias porque existe aire en el interior del vertedero. Los organismos, aerobios y anaerobios, para llevar a cabo la degradación de los residuos se encuentran presentes en el suelo.

3.2.2. Fase II. Fase de transición

En esta fase empiezan a desarrollarse unas condiciones anaerobias como consecuencia de una reducción del oxígeno presente.

Mientras el vertedero se convierte en anaerobio, el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica, a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. El comienzo de condiciones anaerobias se puede supervisar midiendo el potencial de oxidación/reducción que tiene el residuo.

Mientras sigue bajando el potencial de oxidación/reducción, los miembros de la comunidad microbiana responsables de la conversión del material orgánico de los RSU en metano y dióxido de carbono empiezan un proceso de tres pasos, con la conversión de material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios, como se describe en la fase III.

En la fase II, la presencia de elevadas concentraciones de CO_2 y de ácidos orgánicos producen una disminución del pH del lixiviado.

3.2.3. Fase III. Fase ácida

En la fase ácida se incrementa la actividad microbiana iniciada en la fase II, produciéndose grandes cantidades de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas hidrógeno.

El primer paso que se produce en la fase ácida es la hidrólisis, que consiste en la transformación, mediante enzimas, de compuestos con alto peso molecular, en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular.

El segundo paso es la acidogénesis, que implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético y las pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros gases ácidos más complejos.

Por último, se produce la acetogénesis, que consiste en transformar algunos de los productos de la fermentación que no pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, en otros más sencillos, a partir de las bacterias acetogénicas.

El principal gas que se genera durante esta fase es el dióxido de carbono (CO_2) y, por otro lado, también se producen, en menor proporción, cantidades de gas hidrógeno (H_2).

El pH del lixiviado, si se forma, suele caer a valores de 5 o menos, por la presencia de los ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO_2 dentro del vertedero. La disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado causa un aumento significativo en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y en la conductividad del lixiviado. Durante esta fase tiene lugar la solubilización de algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, a causa de los bajos valores del pH en el lixiviado.

Muchos nutrientes esenciales también se separan con el lixiviado en la fase III. Si el lixiviado no se recicla, se perderán del sistema nutrientes esenciales. Si no se forma lixiviado, quedarán dentro del vertedero productos de conversión producidos durante la fase III como constituyentes absorbidos en el agua contenida por los residuos.

3.2.4. Fase IV. Fase de fermentación del metano

En la fase de fermentación del metano, un segundo grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida en CH_4 y CO_2 , llegan a ser más predominantes.

Los microorganismos metanogénicos son anaerobios y, además son los responsables de la conversión. En la fase IV la formación de metano y ácido se produce de manera simultánea, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida.

Como los ácidos y el gas hidrógeno producidos por los formadores de ácidos se han convertido en CH_4 y CO_2 en la fase IV, el pH dentro del vertedero subirá a valores más neutros, en el rango de 6,8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, si se forma, subirá, y se reducirán las concentraciones de DBO_5 y DQO y el valor de la conductividad del lixiviado. Con valores más altos de pH, menos constituyentes inorgánicos quedan en la disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirá.

3.2.5. Fase V. Fase de maduración

La fase de maduración se caracteriza por una reducción en el contenido de humedad y por la degradación de material biodegradable que no se encontraba disponible con anterioridad. Además, la fase V es mucho menos activa en cuanto a generación de gases.

Los nutrientes diluidos en el lixiviado y la lenta degradación de los sustratos disponibles en el medio sólido provocan una significativa disminución en la generación de gas.

Según las medidas de sellado del vertedero, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el biogás.

3.3. Duración de las fases

La duración de las fases individuales de producción del gas de vertedero variará según la distribución de los componentes orgánicos en el vertedero, la disponibilidad de nutrientes, el contenido en humedad de los residuos, el paso de la humedad por el relleno y el grado de compactación inicial.

3.4. Modelos disponibles para la evaluación de la producción de biogás

Existe una gran variedad de métodos para estimar la producción de biogás generada en los vertederos de residuos sólidos urbanos. Dichos métodos difieren entre sí, ya que asumen distintas hipótesis. Además, cada uno de ellos ha sido desarrollado por diferentes entidades para su uso en casos determinados. Es posible que un modelo únicamente sea óptimo para un determinado tipo de vertedero y para unas condiciones climáticas particulares. En este apartado se recogen algunos de los modelos empleados para el cálculo de la producción de biogás, los cuales se clasificarán en modelos de orden cero, de primer orden y en otro tipo de modelos.

3.4.1. Orden cero

SWANA (Solid Waste Association of North America)

Modelo empleado para la estimación de generación de biogás. Considera que la edad y el tipo de los residuos no tienen ningún efecto sobre la producción de biogás. (García *et al.*, 2013)

$$Q = \frac{M \cdot L_0}{t_0 - t_1} \quad \text{para } t_0 < t < t_1 \quad (3.1.)$$

donde

- Q, generación de metano (m³/año)
- W, cantidad de residuos depositados (toneladas)
- L₀, potencial de generación de metano (m³/tonelada)
- t, tiempo (años)
- t₀, tiempo de desfase (años)
- t₁, tiempo de cese de generación (años)

IPCC

Este modelo está basado en la población y en la cantidad de materia orgánica degradable existente en los residuos. (Rodrigo, 2016)

$$Q = \left(MSW_T \cdot MSW_F \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} R \right) \cdot (1 - OX) \quad (3.2.)$$

donde

- Q, emisiones de metano (Gg CH₄/año)
- MSWT, residuos o RSU totales generados en base a la población (t RSU/año)

MSWF, fracción de residuos o RSU depositada en el vertedero
 MCF, fracción de corrección del metano
 DOC, carbono orgánico que se degrada (kg C/kg RSU)
 DOCF, fracción de DOC que realmente se degrada
 F, fracción de metano presente en el biogás (0,5)
 16/12, conversión de C a CH₄
 R, metano recuperado (Gg CH₄/año)
 OX, factor de oxidación (0)

EPER Germany

Es un modelo de orden cero, que puede ser descrito matemáticamente por:

$$Me = M \cdot BDC \cdot BDC_f \cdot F \cdot D \cdot C \quad (3.3.)$$

donde

Me, emisiones difusas de metano (tonelada CH₄/año)
 M, cantidad anual de residuos depositados (tonelada RSU/año)
 BDC, proporción de carbono biodegradable (0,15) (tonelada C/tonelada RSU)
 BDC_f, proporción de carbono biodegradable convertido (0,5)
 F, factor de conversión de C en CH₄ (1,33) (tonelada CH₄/tonelada C)
 D, eficiencia en la recuperación de biogás:
 - Con sistema de recuperación (0,4)
 - Sin sistema de recuperación (0,9)
 - Con sistema de recuperación y capa de cubrición (0,1)
 C, concentración de metano (50) (%)

3.4.2. Orden uno

Los modelos expuestos a continuación han sido descritos por “García *et al.*” en 2013 y, explican la generación de biogás en los siguientes supuestos.

Modelo Mejicano de Biogás

El modelo asume que el comienzo de generación de biogás comienza un año después de la colocación de los residuos en el vertedero. Estima la generación de biogás empleando una ecuación de primer orden.

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2 \cdot k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot e^{k_{t_{ij}}} \cdot (MCF) \cdot (F) \quad (3.4.)$$

donde

Q_{LFG} , generación anual de biogás ($m^3/año$)
 i , incremento de un año
 n , año de cálculo-año de inicio de deposición de residuos
 j , incremento de 0,1 año
 k , tasa de generación de metano ($año^{-1}$)
 L_0 , potencial de generación de metano ($m^3/tonelada$)
 M_i , cantidad de residuos aceptados en el año i (toneladas)
 t_{ij} , edad de la sección de residuos j aceptados en el año i
MCF, factor de corrección de metano
 F , factor de ajuste por incendios

SWANA Simple First Order Model

Los modelos de primer orden asumen que la tasa de generación de biogás decae exponencialmente con el tiempo. Se introducen los efectos de la edad de los residuos en la producción de biogás.

$$G = W \cdot L_0 \cdot k \cdot e^{-k(t-t_1)} \quad (3.5.)$$

donde

G , generación de metano ($m^3/año$)
 W , cantidad de residuos depositados (toneladas)
 L_0 , potencial de generación de metano ($m^3/tonelada$)
 t_1 , tiempo de desfase (entre la disposición de los residuos y el inicio de la generación)
 k , constante de degradación ($año^{-1}$)

SWANA Modified First Order Model

Considera que la generación/recuperación de metano puede ser inicialmente baja, pero la recuperación irá en aumento hasta llegar a un máximo antes de comenzar a disminuir.

$$G = W \cdot L_0 \cdot \frac{k+s}{s} \cdot (1 - e^{-s(t-t_1)}) \cdot (k \cdot e^{-k(t-t_1)}) \quad (3.6.)$$

donde

t , tiempo desde el depósito (años)
 s , constante de fase de primer orden

SWANA First Order Multi-Phase Model

Considera que las diferentes fracciones de residuos se descomponen a diferentes tasas.

$$G = W \cdot L_0 \cdot [F_{(r)} \cdot (k_{(r)} \cdot e^{-k_{(r)}(t-t_1)}) + F_{(s)} \cdot (K_{(s)} \cdot e^{-k_{(s)}(t-t_1)})] \quad (3.7)$$

donde

$k_{(r)}$, constante de degradación de la fracción de residuos con degradación rápida (año⁻¹)

$k_{(s)}$, constante de degradación de la fracción de residuos con degradación lenta (año⁻¹)

$F_{(r)}$, fracción de residuo con degradación rápida (%)

$F_{(s)}$, fracción de residuo con degradación lenta (%)

Scholl Canyon Model

Considera que la generación de biogás llega al máximo después de la fase inicial de estabilización. Después la tasa de generación decrece debido a la disminución de la fracción orgánica de los residuos.

$$Q = k \cdot L_0 \cdot R \cdot e^{-k(t-x)} \quad (3.8.)$$

donde

Q , generación de biogás (m³/año)

R , residuos en el vertedero (toneladas)

$(t-x)$, antigüedad de cada periodo de disposición (años)

LFGGEN

Este modelo fue desarrollado por la Universidad Central de Florida. Las hipótesis para este modelo son:

- La metanogénesis va precedida por una fase de latencia
- En la primera parte de la metanogénesis, la tasa de generación sigue una función lineal
- La segunda parte de la metanogénesis sigue una cinética de primer orden

Además, otras hipótesis del modelo son las siguientes:

- El método de análisis proporciona:
 - La generación teórica por estequiometría del carbono y del metano

- Los factores de biodegradabilidad
- El potencial bioquímico de metano
- Los residuos biodegradables se dividen en once categorías
- El contenido en humedad se clasifica en tres categorías: húmedo, moderado y seco
- Tres fracciones de biodegradabilidad: rápida, moderada y lenta

El modelo incluye un desfase de tiempo para establecer las condiciones anaerobias, seguido de un incremento lineal hasta llegar a la tasa máxima, Q_s , que ocurre a final de año, t_p . Después del pico, la generación decrece exponencialmente hasta ser casi nula al final del tiempo de biodegradación preestablecido, t_{99} , tiempo en que la generación de biogás cae por debajo del 1% del pico (Kamalan *et al.*, 2011):

$$Q_s = L_0 \cdot \frac{2k}{k(t_p - t_0) + 2} \quad (3.9.)$$

donde

Q_s , tasa máxima específica de metano ($\text{m}^3/\text{año}/\text{kg RSU}$)

L_0 , potencial de la generación de metano ($\text{m}^3/\text{kg RSU}$)

t_0 , desfase de tiempo (año)

t_p , tiempo en que se alcanza la tasa máxima específica (año)

k , constante de biodegradación (año^{-1})

Para la segunda fase de la metanogénesis, la constante de biodegradación, k , es:

$$k = \frac{-\ln 0,01}{t_{99} - t_p} \quad (3.10.)$$

donde

t_{99} , tiempo en el que la generación de biogás es menor que el 1% de Q_s (año)

Por otro lado, Scharff y Jacobs describieron en 2006 los modelos presentados a continuación.

TNO (*The Netherlands Organisation of Applied Research*)

El modelo TNO surgió de un estudio, realizado en 1994, en diferentes vertederos holandeses. Es la herramienta empleada por el gobierno holandés para el cálculo de las emisiones de metano en vertederos.

Este modelo calcula la producción de biogás a partir del carbono orgánico degradado de los residuos.

$$\alpha_t = \zeta \cdot 1,87 \cdot A \cdot C_0 \cdot k_t \cdot e^{k_1 t} \quad (3.11.)$$

donde

α_t , producción de biogás en un tiempo dado (m^3 biogás/año)
 ζ , factor de disimilación (0,58)
 1,87, factor de conversión (m^3 biogás/kg C degradado)
 A, cantidad de residuos (toneladas RSU)
 C_0 , cantidad de carbono orgánico en los residuos (kg C/tonelada RSU)
 K_1 , constante de degradación (0,094) ($año^{-1}$)
 t, tiempo transcurrido desde el depósito (año)

Modelo multi-fase Afvalzorg

El modelo fue desarrollado por la Universidad de Agricultura de Wageningen, está basado en el modelo TNO y en las recomendaciones de “*Adviescentrum Stortgas*”.

El modelo Afvalzorg, por ser multi-fase, posee la ventaja de diferenciar diferentes tipos de residuos que contienen diferentes cantidades de carbono orgánico. El modelo diferencia ocho categorías de residuos y tres fracciones de carbono orgánico.

$$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 cAC_{0,i}k_{1,i}e^{-k_{1,i}t} \quad (3.12.)$$

donde

α_t , producción de biogás en un tiempo dado (m^3 biogás/año)
 ζ , factor de disimilación
 C, factor de conversión (m^3 biogás/kg MO degradada) (0,7;0,74)
 i, fracción de residuo con una tasa de degradación $k_{1,i}$ (kg/kg RSU)
 A, cantidad de residuos (toneladas RSU)
 C_0 , cantidad de carbono orgánico en los residuos (kg MO/tonelada RSU)
 $k_{1,i}$, constante de degradación ($año^{-1}$)
 t, tiempo transcurrido desde el depósito (año)

EPER France

El modelo proporciona dos aproximaciones para estimar las emisiones de metano procedentes de vertederos. El operador puede seleccionar el enfoque más adecuado:

- Emisiones de metano en celdas conectadas a sistema de recuperación de gas usando datos de gas recuperado y eficiencia en la recuperación del mismo.

- Emisiones de metano en celdas conectadas o no a sistemas de recuperación de gas, usando un modelo multi-fase y la eficiencia en la recuperación de gas.

Las emisiones de metano para las celdas de vertedero conectadas a un sistema de recuperación de gas pueden ser calculadas mediante la siguiente ecuación:

$$A = F \cdot H \cdot [CH_4] \quad (3.13.)$$

donde

A, cantidad de gas recuperada ($m^3 CH_4/año$)

F, tasa de extracción de biogás ($m^3 LFG/h$)

H, horas anuales de funcionamiento del compresor (h/año)

$[CH_4]$, concentración de metano en el biogás ($m^3 CH_4/m^3 LFG$)

La segunda aproximación calcula la producción de metano mediante la siguiente ecuación multi-fase:

$$FE_{CH_4} = \sum_x FE_0 \cdot (\sum_{1,2,3} A_i \cdot p_i \cdot k_i \cdot e^{-k_i t}) \quad (3.14.)$$

donde

FE_{CH_4} , producción anual de metano ($m^3 CH_4/año$)

FE_0 , generación potencial de metano ($m^3 CH_4/ tonelada RSU$)

p_i , fracción de residuo con tasa de degradación K_i ($kg_i/kg RSU$)

k_i , constante de degradación de la fracción i ($año^{-1}$)

t , edad de los residuos (año)

A_i , factor de normalización

GasSim

Este modelo fue desarrollado por “Golder Associates” para las agencias medioambientales de Inglaterra y Gales.

El modelo utiliza información sobre la composición y cantidad de los residuos, ingeniería de vertederos y las técnicas de gestión del gas de vertederos para permitir la evaluación de la mejor combinación de medidas de control para un diseño particular y una tasa de llenado. Las salidas del modelo incluyen:

- Estimación de la cantidad de gas generado en el vertedero
- Emisiones de la combustión del biogás en las antorchas
- Fugas a través de la tapa y el forro lateral
- Impactos en la calidad del aire a corto y largo plazo
- Migraciones terrestres

- Cálculos del inventario de contaminación
- Exposición humana

Con todo esto, es posible tener una idea global de cómo funcionan los modelos, más populares, empleados para el cálculo de la producción de biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos.

Más adelante, se describirá con un mayor grado de detalle el modelo LandGEM, ya que es el que ha sido elegido para la realización de este Trabajo Final de Máster.

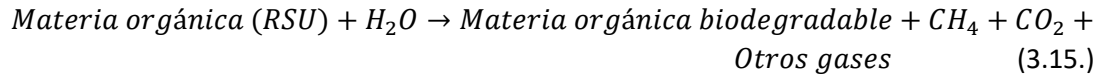
En la tabla 3.1. se presenta un resumen de todos los modelos disponibles para el cálculo de la generación de biogás comentados anteriormente.

Tabla 3.1. Modelos disponibles

Modelos	Orden	Fórmula	Comentarios
SWANA	Cero	$Q = \frac{M \cdot L_0}{t_0 - t_1}$	Considera que la edad y el tipo de residuos no tienen ningún efecto
IPCC	Cero	$Q = \left(MSW_T \cdot MSW_F \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} R \right) \cdot (1 - OX)$	Basado en la población y la cantidad de M.O. degradable en los residuos
EPER Germany	Cero	$Me = M \cdot BDC \cdot BDC_f \cdot F \cdot D \cdot C$	Considera la concentración de metano como un 50%
Modelo Mejicano Biogás	Uno	$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2 \cdot k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10} \right) \cdot e^{k_{tij}} \cdot (MCF) \cdot (F)$	La generación de biogás comienza un año después de colocar los residuos
SWANA Simple	Uno	$G = W \cdot L_0 \cdot k \cdot e^{-k(t-t_1)}$	La generación de biogás decae exponencialmente con el tiempo
SWANA Modified	Uno	$G = W \cdot L_0 \cdot \frac{k+s}{s} \cdot (1 - e^{-s(t-t_1)}) \cdot (k \cdot e^{-k(t-t_1)})$	La generación irá en aumento hasta alcanzar un máximo antes de comenzar a disminuir
SWANA Multi-phase	Uno	$G = W \cdot L_0 \cdot [F_{(r)} \cdot (k_{(r)} \cdot e^{-k_{(r)}(t-t_1)}) + F_{(s)} \cdot (K_{(s)} \cdot e^{-k_{(s)}(t-t_1)})]$	Las diferentes fracciones de residuos se descomponen a diferentes tasas
School Canyon Model	Uno	$Q = k \cdot L_0 \cdot R \cdot e^{-k(t-x)}$	La generación de biogás llega al máximo después de la fase de estabilización
LFGGEN	Uno	$Q_s = L_0 \cdot \frac{2k}{k(t_p - t_0) + 2}$	Tiempo de desfase para incluir las condiciones anaerobias
TNO	Uno	$\alpha_t = \zeta \cdot 1,87 \cdot A \cdot C_0 \cdot k_t \cdot e^{k_1 t}$	Cálculo de la producción a partir del carbono orgánico degradado
Modelo multi-fase Afvalzorg	Uno	$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 c A C_{0,i} k_{1,i} e^{-k_{1,i} t}$	Diferencia diferentes tipos de residuos
EPER France	Uno	$A = F \cdot H \cdot [CH_4]$	Se puede seleccionar entre dos aproximaciones para estimar las emisiones de metano

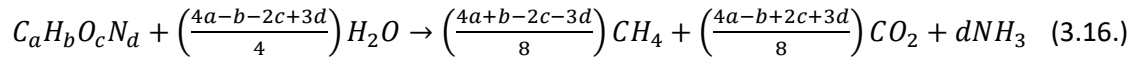
3.4.3. Modelo de degradación completa de la materia orgánica

La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la manera siguiente:



Se debe resaltar que la reacción requiere de la presencia de agua. Aunque la cantidad total del gas que se produce a partir de residuos sólidos se derive directamente de una reacción estequiométrica, las condiciones hidrológicas locales afectan significativamente a la velocidad y al período de tiempo en el que tiene lugar la producción del gas.

El volumen de los gases emitidos durante la descomposición anaerobia puede estimarse de la siguiente manera:



En general, los materiales orgánicos presentes en los residuos sólidos se pueden dividir en dos clasificaciones: aquellos materiales que se descomponen rápidamente (tres meses a cinco años) y aquellos materiales que se descomponen lentamente (hasta 50 años o más).

Tabla 3.2. Constituyentes orgánicos rápida y lentamente biodegradables en los RSU

Componentes de residuos orgánicos	Rápidamente biodegradable	Lentamente biodegradable
Residuos de comida	sí	
Periódicos	sí	
Papel de oficina	sí	
Cartón	sí	
Plásticos ^a		
Textiles		sí
Goma		sí
Cuero		sí
Residuos de jardín	sí ^b	sí ^c
Madera		sí
Orgánicos misceláneos		sí

Fuente: Tchobanoglous et al. (1993)

^a Los plásticos generalmente son considerados como no biodegradables.

^b Hojas y recortes de césped. Normalmente, el 60 por 100 de los residuos de jardín son considerados como rápidamente biodegradables

^c Porciones leñosas de los residuos de jardín

En condiciones normales, la velocidad de descomposición, medida por la producción de gas, llega a su cima dentro de los primeros dos años y después baja lentamente, continuando en muchos casos durante períodos de hasta 25 años o más.

La variación en la tasa de producción del gas a partir de la descomposición anaerobia de los materiales orgánicos de los RSU rápidamente biodegradables y lentamente biodegradables se puede representar como se muestra en la figura 3.2.

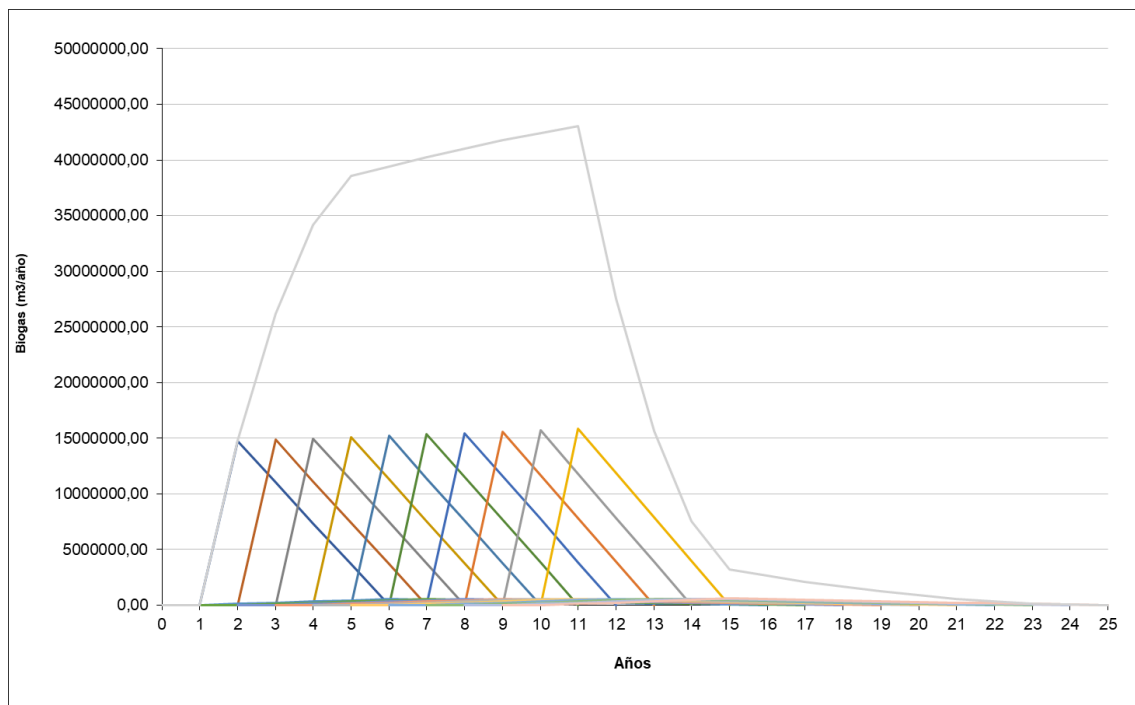


Figura 3.2. Representación gráfica de la producción de gas durante un período de 10 años

Las tasas anuales de descomposición de los residuos rápida y lentamente biodegradables se basan en un modelo triangular de producción de gas en el que la tasa punta de producción se produce en 1 y 5 años, respectivamente. Se asume que la producción de gas se inicia a finales del primer año de la puesta en funcionamiento del vertedero. El área debajo de cada triángulo se corresponde con la cantidad de gas procedente de los residuos depositados durante el primer año de funcionamiento, y es igual a:

$$\begin{aligned} \text{Total gas producido, } \frac{kg}{m^3} &= \\ &= \frac{1}{2} (\text{base, año}) \cdot (\text{altura, tasa punta de producción de gas, } kg/m^3 \cdot \text{año}) \end{aligned} \quad (3.17.)$$

En muchos casos, la humedad presente en los vertederos es insuficiente para permitir la conversión completa de los constituyentes orgánicos biodegradables de los RSU. El

contenido en humedad óptimo para permitir dicha conversión debería estar entorno del 50 al 60 por 100. Por otro lado, existen casos en los que la humedad no se reparte de manera uniforme por todo el vertedero. Cuando esto ocurre, la curva que representa la producción de biogás se aplana y se extiende durante un período de tiempo más largo, como puede observarse en la figura 3.3.

La producción de biogás en largos períodos de tiempo resulta de gran importancia respecto a la estrategia de gestión que se va a adoptar en la fase postclausura.

Con todo esto, es posible tener una idea de cómo funciona la metodología clásica para el cálculo de la producción de biogás en vertederos, que será desarrollada, con un ejemplo real, en siguientes capítulos del presente trabajo.

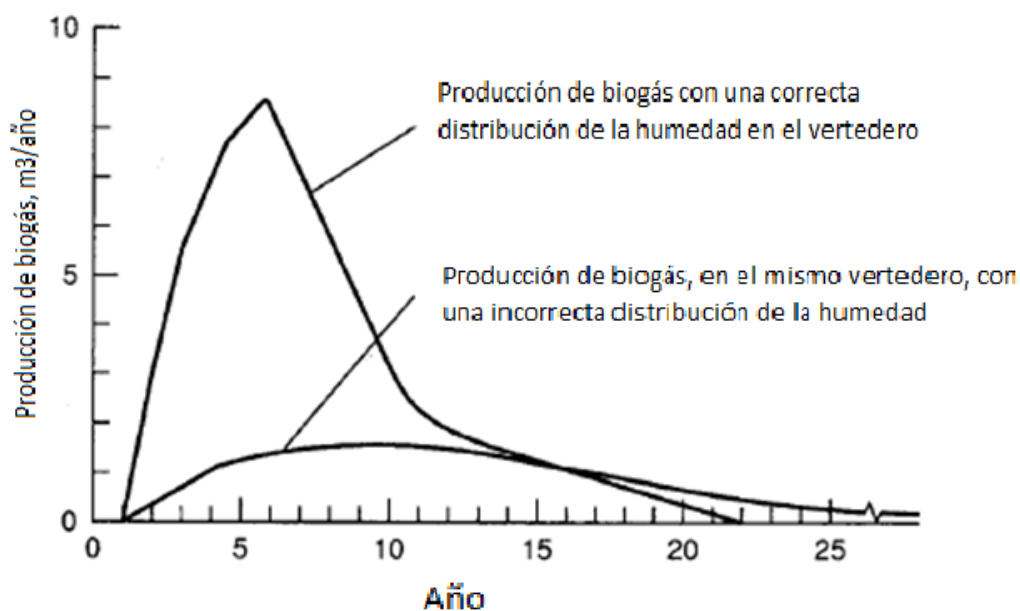


Figura 3.3. Efecto de un contenido de humedad reducido

3.4.4. LandGEM

LandGEM es una herramienta de estimación automatizada en una interfaz de Microsoft Excel, que puede ser empleada para el cálculo de las emisiones totales de gas producidas en un vertedero o, para el cálculo del metano, dióxido de carbono, compuestos orgánicos sin contenido de metano y contaminantes del aire.

La herramienta puede emplear datos específicos del lugar de estudio para el cálculo de las emisiones o, por el contrario, utilizar los parámetros que por defecto están definidos en el programa.

El modelo contiene dos conjuntos de parámetros por defecto. El primer parámetro, el CAA, está basado en las regulaciones federales para vertederos de residuos sólidos urbanos dispuestas por la *“Clean Air Act”* (CAA) y puede ser usado para determinar si un vertedero está sujeto a los controles requeridos de estas regulaciones. Por otro lado, el segundo parámetro, el inventario, está basado en los factores de emisión de la *“EPAS’s Compilation of Air Pollutant Emission Factors”* (AP-42) y puede ser usado para la generación de estimaciones de emisiones para el uso en inventarios de emisiones y para permisos de aire en ausencia de datos.

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE DESCOMPOSICIÓN COMPLETA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RSU

Para proceder al cálculo de la generación de biogás, empleando el método convencional, se ha implementado una hoja de cálculo Excel en la que se realizan los cálculos de igual manera que en el método convencional.

Dicha hoja de cálculo está compuesta por seis hojas de trabajo, que realizan por partes los diferentes pasos que componen el método convencional. Estas hojas son:

- “Composición de los residuos”
- “Ecuación estequiométrica RBD (Residuos rápidamente biodegradables)”
- “Biogás generado RBD”
- “Ecuación estequiométrica LBD (Residuos lentamente biodegradables)”
- “Biogás generado LBD”
- “Gráficas”

Cabe destacar que aquellas celdas coloreadas en amarillo son datos que el usuario debe introducir en la herramienta, con el fin de que puedan realizarse los cálculos de la manera correcta.

A continuación, se procede a explicar de forma detallada las diferentes hojas de trabajo enumeradas anteriormente.

La hoja “Composición de los residuos” proporciona a los usuarios un listado de los componentes que, con mayor frecuencia, se pueden encontrar en los vertederos de la Comunidad Valenciana. El usuario debe seleccionar entre los diferentes compuestos, en función del vertedero de estudio, e introducir el porcentaje en peso y la humedad de cada uno de ellos dentro del vertedero.

Tabla 4.1. Composición de los residuos

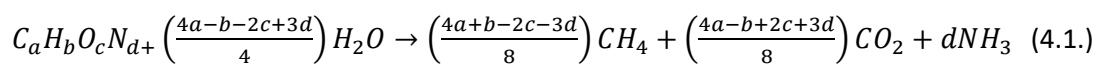
COMPONENTES	% Peso	Humedad
Restos de comida		
Papel-cartón		
Plásticos		
Vidrio		
Textiles		
Goma		
Cuero		
Residuos de jardín		
Madera		
Metales férricos		
Metales no férricos		
Otros		

Por otro lado, en las hojas “Ecuación estequiométrica RBD” y “Ecuación estequiométrica LBD” se presenta la ecuación estequiométrica que emplea la herramienta para la estimación de biogás. Existen diferentes tipos de ecuaciones, en función del tipo de degradación que se considere, completa o incompleta.

El cálculo de la producción de biogás en vertederos es bastante complejo, por ello la mayoría de los modelos estequiométricos emplean ecuaciones de degradación completa, ya que son más sencillos de ajustar y, de este modo, no añaden más dificultad al proceso de cálculo. Estas ecuaciones requieren de unas condiciones ideales en el vertedero, ya que asumen la degradación completa y producción de biogás de toda la fracción biodegradable.

Por otro lado, las ecuaciones de degradación incompleta asumen que la materia orgánica no desaparece en su totalidad, sino que una fracción de la misma queda presente en el vertedero.

La hoja de cálculo emplea la ecuación estequiométrica, de degradación completa, presentada por Tchobanoglous *et al.*, (1993).



En las hojas “Ecuación estequiométrica RBD” y “Ecuación estequiométrica LBD” únicamente se deben de introducir la fracción rápida y lentamente biodegradable, respectivamente, de los residuos de jardín y el análisis elemental de los residuos.

Parte RBD de los residuos de jardín=		%
--------------------------------------	--	---

Figura 4.1. Parte RBD de los residuos de jardín

Parte LBD de los residuos de jardín=		%
--------------------------------------	--	---

Figura 4.2. Parte LBD de los residuos de jardín

Tabla 4.2. Composición de los residuos RBD

COMPONENTES	Peso seco	Peso húmedo	C	H	O	N	S y cenizas
Restos de comida							
Papel-cartón							
Residuos de jardín							
TOTAL							
Número de moles							
Número entero de moles							

Tabla 4.3. Composición de los residuos LBD

COMPONENTES	Peso seco	Peso húmedo	C	H	O	N	S y cenizas
Textiles							
Goma							
Cuero							
Residuos de jardín							
Madera							
TOTAL							
Número de moles							
Número entero de moles							

Con todo esto ya sería posible resolver la ecuación estequiométrica.

Por otro lado, la herramienta contiene las hojas de trabajo “Biogás generado RBD” y “Biogás generado LBD”. En ambas hojas se muestran las cantidades de biogás que se generan en el vertedero por la descomposición de los residuos rápida y lentamente biodegradables.

Biogás generado por cada 100 kg de RSU						m ³ de CH ₄
						m ³ de CO ₂

Figura 4.3. Biogás generado por cada 100 kg de RBD

Total biogás producido por kg de RSU=		m ³ /kg RSU
---------------------------------------	--	------------------------

Figura 4.4. Biogás generado por cada kilogramo de RBD

Biogás generado por cada 100 kg de RSU						m ³ de CH ₄
						m ³ de CO ₂

Figura 4.5. Biogás generado por cada 100 kg de LBD

Total biogás producido por kg de RSU=		m ³ /kg RSU
---------------------------------------	--	------------------------

Figura 4.6. Biogás generado por cada kilogramo de LBD

Por último, la herramienta consta de la hoja “Gráficas”. En ella se muestran los resultados obtenidos, aplicando la metodología descrita por Tchobanoglous *et al.*, (1993), en forma de gráficas. Esta hoja de trabajo necesita conocer el tiempo que

tardan en descomponerse los residuos y las cantidades de éstos que van a entrar anualmente en el vertedero. Estos datos deben ser introducidos por el usuario.

Tabla 4.4. Tiempo de descomposición de los residuos

Tiempo que tardan en descomponerse los residuos RBD		años
Tiempo que tardan en descomponerse los residuos LBD		años

Tabla 4.5. Cantidad de residuos depositados en el vertedero al año

Cantidad de residuos depositados en el vertedero al año	Año 1	Año 2	Año 3

La tabla 4.5. podría ser modificada en función de los años en los que el vertedero se encuentre en funcionamiento, como ha sido el caso en este trabajo.

5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO LANDGEM

5.1. Introducción

LandGEM es un modelo que se basa en una ecuación de descomposición de primer orden que cuantifica las emisiones provenientes de la descomposición de los residuos depositados en los vertederos de residuos sólidos urbanos. El software proporciona una aproximación, relativamente simple, para la estimación de las emisiones de gas de los vertederos. Los valores predeterminados del modelo se basan en datos empíricos de vertederos de los Estados Unidos. Los valores obtenidos en las pruebas de campo también pueden ser usados en lugar de los valores predeterminados cuando sea posible.

LandGEM es considerado una herramienta de detección: cuanto mejores sean los datos de entrada, mejores serán las estimaciones. A menudo, hay limitaciones con los datos disponibles con respecto a la cantidad de residuos y composición, variación en el diseño y prácticas operativas a lo largo del tiempo, y cambios que ocurren con el tiempo que tienen un impacto en el potencial de emisión. Cambios en la operación del vertedero, como operar bajo condiciones de humedad a través de la recirculación del lixiviado o la adición de otros líquidos, tendrá como resultado la generación de gas a un ritmo más rápido.

5.2. Estructura del modelo

LandGEM consta de nueve hojas de trabajo dentro de una hoja de cálculo de Microsoft Excel. Los nombres y funciones de cada hoja de trabajo se encuentran en la tabla 5.1.

A continuación, se da una explicación de cada una de las hojas de trabajo que componen la tabla 5.1.

En la hoja “Intro” se puede encontrar un breve resumen del modelo y de las diferentes hojas de trabajo que componen LandGEM además, de una serie de notas importantes a tener en cuenta en su utilización.

El apartado “User Inputs” es donde el usuario debe introducir las diferentes características del vertedero que se va a estudiar (nombre o identificador del vertedero, año de apertura y de clausura o, en su defecto, marcar la opción de que la herramienta calcule el año de clausura y la cantidad de residuos que se depositarán en el vertedero anualmente). Además, el usuario deberá seleccionar los diferentes parámetros del modelo y los diferentes gases o contaminantes que desea sean calculados.

Los gases y contaminantes que emplea LandGEM aparecen en la hoja “*Pollutants*”. De cada uno de ellos se muestra su concentración y su peso molecular. Además, el usuario puede añadir gases y contaminantes que no aparezcan.

En la hoja “*Input Review*” aparece un resumen de todos los datos introducidos hasta el momento.

Tabla 5.1. Nombre y función de las diferentes hojas de trabajo que forman LandGEM

Worksheet Name	Function
INTRO	Contains an overview of the model and important notes about using LandGEM
USER INPUTS	Allows users to provide landfill characteristics, determine model parameters, select up to four gases or pollutants (total landfill gas, methane, carbon dioxide, NMOCs, and 46 air pollutants), and enter waste acceptance rates
POLLUTANTS	Allows users to edit air pollutant concentrations and molecular weights for existing pollutants and add up to 10 new pollutants
INPUT REVIEW	Allows users to review and print model inputs
METHANE	Calculates methane emission estimates using the first-order decomposition rate equation
RESULTS	Shows tabular emission estimates for up to four gases/pollutants (selected in the USER INPUTS worksheet) in megagrams per year, cubic meters per year, and user’s choice of a third unit of measure (average cubic feet per minute, cubic feet per year, or short tons per year)
GRAPHS	Shows graphical emission estimates for up to four gases/pollutants (selected in the USER INPUTS worksheet) in megagrams per year, cubic meters per year, and user’s choice of a third unit of measure (selected in the RESULTS worksheet)
INVENTORY	Displays tabular emission estimates for all gases/pollutants for a single year specified by users
REPORT	Allows users to review and print model inputs and outputs in a summary report

Fuente: User’s Manual LandGEM

Las emisiones de metano se calculan a partir de la ecuación de primer orden empleada por el modelo. Los resultados, de dichas emisiones, aparecen en la hoja “*Methane*”.

El apartado “*Results*” muestra las emisiones estimadas para los cuatro gases y/o contaminantes seleccionados por el usuario. Los resultados se muestran ordenados de

manera tabular y en diferentes unidades (megagramos por año, metros cúbicos por año y una tercera que elige el usuario).

La hoja “*Graphs*” muestra las emisiones estimadas en el apartado “*Results*” de una forma gráfica.

“*Inventory*” muestra las emisiones estimadas para todos los gases y contaminantes que maneja LandGEM, para un único año seleccionado por el usuario.

En el apartado “*Report*” se detallan todos los datos introducidos y los resultados obtenidos por LandGEM, para que puedan ser visualizados por el usuario de una manera sencilla.

5.3. Ecuaciones consideradas

LandGEM usa la siguiente ecuación de descomposición de primer orden para el cálculo de las emisiones durante el periodo que se especifique:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k \cdot L_0 \cdot \frac{M_i}{10} \cdot e^{-kt_{i,j}} \quad (5.1.)$$

donde

- Q_{CH_4} , generación estimada de metano ($m^3/año$)
- i , incremento de 1 año
- n , año del cálculo-año inicial de aceptación de residuos
- j , incremento de 0,1 año
- k , constante de generación de metano (0,04) ($año^{-1}$)
- L_0 , capacidad potencial de generación de metano (100) ($m^3 CH_4/tonelada RSU$)
- M_i , masa de residuos en la sección i (tonelada RSU)
- $t_{i,j}$, edad de la masa de residuos depositada en la sección j en el año i ($año^{-1}$)

5.4. Datos de entrada y de salida

5.4.1. Introducción de las características del vertedero

Las características del vertedero se introducen en la hoja “*User Inputs*” y, son las siguientes:

- Nombre o identificador del vertedero
- Año de apertura. Es el año en que el vertedero comienza a aceptar residuos. Debe de introducirse en un formato de cuatro dígitos (p.e. 2004).

- Año de clausura. Puede ser el año en el que se dejan de aceptar residuos o el año en el que se espera alcanzar la capacidad de diseño. El modelo limita a 80 el número de años en los que se pueden aceptar residuos.
- Opción de que el modelo calcule el año de clausura. En el caso en que el año de clausura sea desconocido, el modelo proporciona la opción de calcularlo. El cálculo que se realiza depende del año de apertura, la capacidad de diseño y de la tasa de aceptación de residuos.
- Capacidad de diseño. Representa la cantidad total de residuos que pueden depositarse en el vertedero. La capacidad de diseño solo debe introducirse cuando se selecciona la opción de que el modelo calcule el año de clausura. La capacidad puede introducirse en megagramos, unidades inglesas o tonelada corta.

USER INPUTS		
Landfill Name or Identifier:		
1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS		Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections
Landfill Open Year		
Landfill Closure Year		
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
Waste Design Capacity		
		megagrams ▼

Figura 5.1. Hoja de trabajo "User Inputs"

Fuente: User's Manual LandGEM

5.4.2. Determinación de los parámetros del modelo

LandGEM se basa en varios parámetros del modelo para estimar las emisiones de los vertederos.

- Ratio de generación de metano (k)
- Capacidad potencial de generación de metano (L_0)
- Concentración NMOC
- Contenido de metano

Los parámetros del modelo pueden seleccionarse del siguiente menú desplegable (Figura 5.2.):

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Restore Default Model Parameters

Methane Generation Rate, k (year^{-1})
CAA Conventional - 0.05

Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)
CAA Conventional - 170

NMOC Concentration (ppmv as hexane)
CAA - 4,000

Methane Content (% by volume)
CAA - 50% by volume

Figura 5.2. Determinación de los parámetros del modelo

Fuente: User's Manual LandGEM

Por otro lado, no es obligatorio emplear los parámetros proporcionados por LandGEM. Existe la posibilidad de poder ingresar unos valores de los parámetros específicos del sitio, basados en pruebas de campo o cualquier otra información disponible.

5.4.2.1. Ratio de generación de metano (k)

La ratio de generación de metano, k , determina la ratio de generación de metano para la masa de residuos existente en el vertedero. Cuanto mayor sea el valor de k , más rápida será la generación de metano, que irá decayendo con el tiempo. El valor de k depende, principalmente, de cuatro factores:

- Contenido de humedad de la masa de residuos
- Disponibilidad de nutrientes para los microorganismos que descomponen los residuos para formar metano y dióxido de carbono
- pH de la masa de residuos
- Temperatura de la masa de residuos

Tabla 5.2. Ratio de generación de metano (k)

Default Type	Landfill Type	k value year ⁻¹
CAA	Conventional	0.05 (default)
CAA	Arid Area	0.02
Inventory	Conventional	0.04
Inventory	Arid Area	0.02
Inventory	Wet (Bioreactor)	0.7

Fuente: User's Manual LandGEM

5.4.2.2. Capacidad potencial de generación de metano (L_0)

La capacidad potencial de generación de metano, L_0 , sólo depende del tipo y composición de los residuos depositados en el vertedero. Cuanto mayor sea el contenido en celulosa de los residuos, mayor será el valor de L_0 . Los valores de L_0 utilizados, por defecto, por LandGEM son representativos de los residuos sólidos urbanos.

Tabla 5.3. Capacidad potencial de generación de metano (L_0)

Emission Type	Landfill Type	L_0 Value - m ³ /Mg
CAA	Conventional	170 (default)
CAA	Arid Area	170
Inventory	Conventional	100
Inventory	Arid Area	100
Inventory	Wet (Bioreactor)	96

Fuente: User's Manual LandGEM

5.4.2.3. Concentración de compuestos orgánicos sin metano (NMOC)

"The NMOC concentration" en el gas de vertederos es función del tipo de residuos presentes en el vertedero y de las reacciones que producen diferentes compuestos procedentes de la descomposición anaeróbica de los residuos.

5.4.2.4. Contenido de metano

LandGEM asume que el gas de vertedero está constituido por un 50 por ciento de metano y un 50 por ciento de dióxido de carbono, adicionalmente, se encuentran trazas constituidas por “NMOC” y otros contaminantes del aire.

También es posible seleccionar otras cantidades de metano si existen datos que apoyen el uso de otra concentración diferente a las que proporciona LandGEM. Sin embargo, usar LandGEM en vertederos en los que el contenido de metano se encuentra fuera del rango de 40-60%, no es recomendable. La ecuación de primer orden usada por LandGEM para determinar las emisiones no es válida fuera de este rango.

La producción de metano se determina usando la ecuación de primer orden, que no se ve afectada por la concentración de metano. Sin embargo, la concentración de metano afecta al cálculo de la producción de dióxido de carbono, que se calcula a partir de la producción de metano y del porcentaje de contenido en metano.

$$Q_{CO_2} = Q_{CH_4} \times \{[1/(P_{CH_4}/100)] - 1\} \quad (5.2.)$$

5.4.3. Selección de gases/contaminantes

Es posible seleccionar cuatro gases o contaminantes del aire para ser modelados al mismo tiempo. Los gases y contaminantes a elegir y los datos asociados a ellos se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Listado de gases y contaminantes

Gas/Pollutant	Concentration (ppmv)	Molecular Weight	Notes
Gases			
Total landfill gas	Not applicable	30.03	
Methane	Not applicable	16.04	
Carbon dioxide	Not applicable	44.01	
NMOCs	4,000 for CAA	86.18	
	600 for Inventory No or Unknown Co-disposal		
	2,400 for Inventory Co-disposal		
Pollutants:			
1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform)	0.48	133.41	A
1,1,2,2-Tetrachloroethane	1.1	167.85	A, B
1,1-Dichloroethane (ethylidene dichloride)	2.4	98.97	A, B
1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride)	0.20	96.94	A, B
1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride)	0.41	98.96	A, B
1,2-Dichloropropane (propylene dichloride)	0.18	112.99	A, B
2-Propanol (isopropyl alcohol)	50	60.11	B
Acetone	7.0	58.08	
Acrylonitrile	6.3	53.06	A, B
Benzene	1.9 for No or Unknown Co-disposal	78.11	A, B
	11 for Co-disposal		
Bromodichloromethane	3.1	163.83	B
Butane	5.0	58.12	B
Carbon disulfide	0.58	76.13	A, B
Carbon monoxide	140	28.01	

Tabla 5.4. Listado de gases y contaminantes (cont.)

Carbon tetrachloride	4.0×10^{-3}	153.84	A, B
Carbonyl sulfide	0.49	60.07	A, B
Chlorobenzene	0.25	112.56	A, B
Chlorodifluoromethane	1.3	86.47	
Chloroethane (ethyl chloride)	1.3	64.52	A, B
Chloroform	0.03	119.39	A, B
Chloromethane	1.2	50.49	B
Dichlorobenzene	0.21	147	B, C
Dichlorodifluoromethane	16	120.91	
Dichlorofluoromethane	2.6	102.92	B
Dichloromethane (methylene chloride)	14	84.94	A
Dimethyl sulfide (methyl sulfide)	7.8	62.13	B
Ethane	890	30.07	
Ethanol	27	46.08	B
Ethyl mercaptan (ethanethiol)	2.3	62.13	B
Ethylbenzene	4.6	106.16	A, B
Ethylene dibromide	1.0×10^{-3}	187.88	A, B
Fluorotrichloromethane	0.76	137.38	B
Hexane	6.6	86.18	A, B
Hydrogen sulfide	36	34.08	
Mercury (total)	2.9×10^{-4}	200.61	A
Methyl ethyl ketone	7.1	72.11	A, B
Methyl isobutyl ketone	1.9	100.16	A, B
Methyl mercaptan	2.5	48.11	B
Pentane	3.3	72.15	B
Perchloroethylene (tetrachloroethylene)	3.7	165.83	A
Propane	11	44.09	B
t-1,2-Dichloroethene	2.8	96.94	B
Toluene	39 for No or Unknown Co-disposal	92.13	A, B
	170 for Co-disposal		
Trichloroethylene (trichloroethene)	2.8	131.40	A, B
Vinyl chloride	7.3	62.50	A, B
Xylenes	12	106.16	A, B

A. Hazardous air pollutants (HAP) listed in Title III of the 1990 Clean Air Act Amendments.

B. Considered volatile organic compounds (VOC), as defined by U.S. EPA in 40 CFR 51.100(s).

C. Source tests did not indicate whether this compound was the para- or ortho- isomer. The para- isomer is a Title III-listed HAP.

Fuente: User's Manual LandGEM

Además, resulta posible modificar los datos de los contaminantes proporcionados o añadir nuevos contaminantes.

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1 Default pollutant parameters are currently being used by model.

Total landfill gas

Gas / Pollutant #2

Methane

Gas / Pollutant #3

Carbon dioxide

Gas / Pollutant #4

NMOC

Edit Existing or Add New Pollutant Parameters

Restore Default Pollutant Parameters

Figura 5.3. Selección o adición de los gases/contaminantes

Fuente: User's Manual LandGEM

5.4.4. Entrada de los datos de aceptación de residuos

Los datos de aceptación de residuos se deben de introducir en la hoja "User Inputs" para que LandGEM pueda estimar adecuadamente las emisiones. Se deben de introducir las tasas de aceptación de residuos para cada uno de los años en los que el vertedero se encuentre operativo (Tabla 5.5.).

Tabla 5.5. Tasas de aceptación de residuos

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: Mg/year

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Fuente: User's Manual LandGEM

El modelo hace las suposiciones que se muestran en la tabla 5.6., con respecto a los datos ingresados en la tabla 5.5.

Tabla 5.6. Suposiciones respectivas a las tasas de aceptación de residuos

If you...	Then LandGEM will...
Enter acceptance rates beyond the <i>Landfill Closure Year</i> you entered,	Ignore the acceptance rates you entered past the <i>Landfill Closure Year</i> .
Enter acceptance rates through the current year but not up to the <i>Landfill Closure Year</i> you entered,	Apply the final (or most recent) acceptance rate you entered to the years between the current year and the <i>Landfill Closure Year</i> .
Enter acceptance rates through the current year and choose to have the model calculate closure year,	Apply the final (or most recent) acceptance rate you entered to each successive year not having an acceptance rate until the waste design capacity is reached. A smaller acceptance rate may be used the last year to achieve the exact design capacity. The final year the landfill receives waste becomes the closure year.

Fuente: User's Manual LandGEM

En la tabla 5.6. se pueden observar tres suposiciones que realiza LandGEM, con respecto a las tasas de aceptación de residuos, que dicen lo siguiente:

- La primera suposición dice que, si se introducen tasas de aceptación de residuos más allá de la fecha de clausura del vertedero, el programa ignorará aquellas tasas que excedan la fecha de clausura.
- La segunda suposición considera que, si se introducen tasas de aceptación de residuos hasta el año en curso, pero no hasta el año de clausura, se debe aplicar la tasa de aceptación final que se ingresó entre el año actual y el año de clausura.
- Por último, la última suposición considera que, si se introducen tasas de aceptación hasta el año en curso, y se elige la opción de que LandGEM calcule el año de clausura, el programa usa la última tasa de aceptación y alguna más pequeña, al final del proceso, para lograr la capacidad de diseño exacta. El último año que el vertedero recibe residuos se convierte en el año de cierre.

5.4.5. "Printing Inputs"

Los datos introducidos, para ser utilizados por LandGEM, pueden ser revisados en la hoja "Input Review". Todos los datos introducidos en la hoja "User Inputs", las entradas determinadas por el modelo, el año de clausura calculado y las tasas de aceptación de residuos, aparecen en la hoja "Input Review".

Microsoft Excel - LandGEM-V3.02 [Read-Only]

FileEditViewInsertFormatToolsDataWindowLandGEMHelp

Type a question for help

Arial10

</

Figura 5.4. "Input review"

Fuente: User's Manual LandGEM

En esta hoja, se puede realizar un repaso de todos los datos introducidos en el modelo. Tiene como ventaja el poder observar, los datos con los que va a trabajar LandGEM, en una misma pantalla, para así comprobar si existe algún tipo de error o, por el contrario, son correctos y se puede seguir trabajando.

5.4.6. Visualización e impresión de los datos tabulados

La hoja “Results” muestra las emisiones estimadas en un formato tabular. Cuando se comparan los resultados de LandGEM con mediciones de gas en un punto, el propietario o el operador del vertedero debe ajustar la infiltración de aire antes de cualquier comparación.

Year	Waste Accepted (Mg/year)	Waste Accepted (short tons/year)	Waste In-Place (Mg)	Waste In-Place (short tons)	Total landfill gas (Mg/year)	Total landfill gas (m ³ /year)	Total landfill gas (av ft ³ /min)	Methane (Mg/year)	Methane (m ³ /year)
1985	181,818	200,000	0	0	0	0	0	0	0
1986	181,818	200,000	181,818	200,000	3.775E+03	3.022E+06	2.031E+02	1.008E+03	1.511E
1987	181,818	200,000	363,636	400,000	7.365E+03	5.097E+06	3.960E+02	1.967E+03	2.949E
1988	181,818	200,000	545,454	599,999	1.078E+04	8.630E+06	5.800E+02	2.880E+03	4.316E
1989	181,818	200,000	727,272	799,999	1.403E+04	1.123E+07	7.548E+02	3.747E+03	5.617E
1990	181,818	200,000	909,090	999,999	1.712E+04	1.371E+07	9.211E+02	4.573E+03	6.854E
1991	181,818	200,000	1,090,908	1,199,999	2.006E+04	1.606E+07	1.079E+03	5.358E+03	8.031E
1992	181,818	200,000	1,272,726	1,399,999	2.286E+04	1.830E+07	1.230E+03	6.105E+03	9.151E
1993	181,818	200,000	1,454,544	1,599,998	2.561E+04	2.043E+07	1.373E+03	6.815E+03	1.022E
1994	181,818	200,000	1,636,362	1,799,998	2.805E+04	2.246E+07	1.509E+03	7.491E+03	1.123E
1995	181,818	200,000	1,818,180	1,999,998	3.045E+04	2.438E+07	1.638E+03	8.134E+03	1.219E
1996	181,818	200,000	1,999,998	2,199,998	3.274E+04	2.622E+07	1.762E+03	8.746E+03	1.311E
1997	181,818	200,000	2,181,816	2,399,998	3.492E+04	2.796E+07	1.879E+03	9.327E+03	1.398E
1998	181,818	200,000	2,363,634	2,599,997	3.699E+04	2.962E+07	1.990E+03	9.901E+03	1.481E
1999	181,818	200,000	2,545,452	2,799,997	3.896E+04	3.120E+07	2.096E+03	1.041E+04	1.560E
2000	181,818	200,000	2,727,270	2,999,997	4.084E+04	3.270E+07	2.197E+03	1.091E+04	1.639E
2001	227,273	250,000	2,909,088	3,199,997	4.262E+04	3.413E+07	2.293E+03	1.138E+04	1.708E
2002	272,727	300,000	3,136,361	3,449,997	4.526E+04	3.624E+07	2.435E+03	1.209E+04	1.812E
2003	318,182	350,000	3,409,088	3,749,997	4.871E+04	3.901E+07	2.621E+03	1.301E+04	1.950E

Figura 5.5. “Results”

Fuente: User’s Manual LandGEM

La hoja “Results” incluye los siguientes datos:

- Año de clausura del vertedero
- Contenido de metano de la hoja “User Inputs”
- Aceptación de residuos, desde el año de apertura hasta el año de clausura del vertedero
- Aceptación anual de residuos
- Cantidad de residuos en el lugar basadas en la tasa de aceptación
- Emisiones anuales estimadas para los cuatro gases/contaminantes seleccionados

5.4.7. Visualización e impresión gráfica de los resultados

La hoja “*Graphs*” muestra las emisiones estimadas en un formato de gráfica.

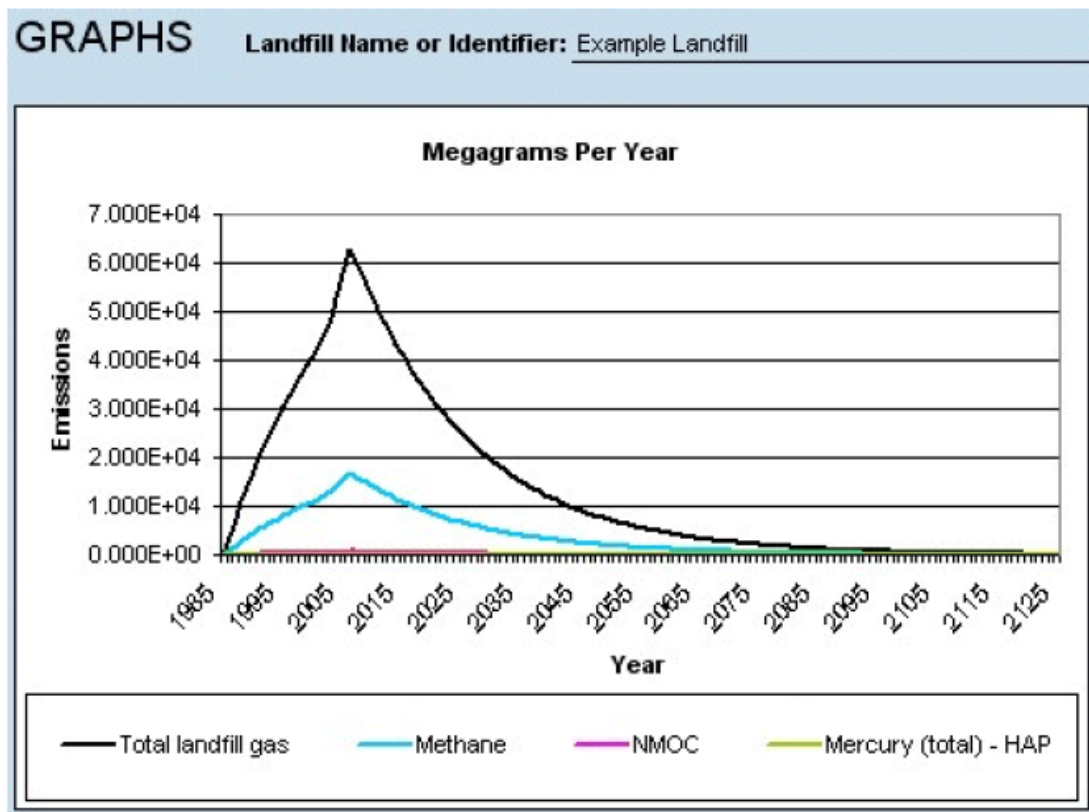


Figura 5.6. Gráfica de las emisiones estimadas (toneladas/año)

Fuente: User's Manual LandGEM

En esta pantalla, se pueden observar, de manera gráfica, las emisiones de los cuatro gases seleccionados en toneladas por año, metros cúbicos por año, y otra unidad de medida que debe seleccionar el usuario.

5.4.8. Visualización e impresión del inventario de resultados

La hoja “Inventory” muestra la estimación de las emisiones para un uso en inventarios de emisiones y para permisos de aire. Esta hoja permite visualizar la estimación de las emisiones para un año en particular de todos los gases o contaminantes.

Gas / Pollutant	Emission Rate				
	(Mg/year)	(m³/year)	(av ft³/min)	(ft³/year)	(short tons/year)
Total landfill gas	5.294E+04	4.239E+07	2.940E+03	1.497E+09	5.824E+04
Methane	1.414E+04	2.120E+07	1.424E+03	7.488E+08	1.566E+04
Carbon dioxide	3.880E+04	2.120E+07	1.424E+03	7.488E+08	4.268E+04
NMOC	6.078E+02	1.836E+05	1.139E+01	5.988E+06	6.686E+02
1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform) - HAP	1.129E-01	2.035E+01	1.367E-03	7.186E+02	1.242E-01
1,1,2,2-Tetrachloroethane - HAP/VOC	3.256E-01	4.663E+01	3.133E-03	1.647E+03	3.581E-01
1,1-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	4.188E-01	1.017E+02	6.836E-03	3.593E+03	4.607E-01
1,1-Dichloroethane (vinylidene chloride) - HAP/VOC	3.419E-02	8.479E+00	5.697E-04	2.994E+02	3.760E-02
1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	7.154E-02	1.730E+01	1.168E-03	6.130E+02	7.070E-02
1,2-Dichloropropane (propylene dichloride) - HAP/VOC	3.686E-02	7.631E+00	5.127E-04	2.695E+02	3.945E-02
2-Propanol (isopropyl alcohol) - VOC	5.289E+00	2.120E+03	1.424E-01	7.488E+04	5.824E+00
Acetone	7.189E-01	2.968E+02	1.994E-02	1.048E+04	7.888E-01
Acrylonitrile - HAP/VOC	5.894E-01	2.671E+02	1.794E-02	9.432E+03	6.484E-01
Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	2.617E-01	8.055E+01	5.412E-03	2.845E+03	2.879E-01
Benzene - Co-disposal - HAP/VOC	1.515E+00	4.663E+02	3.133E-02	1.647E+04	1.667E+00
Dibromodichloromethane - VOC	0.955E-01	1.314E+02	0.030E-03	4.641E+03	9.051E-01
Butane - VOC	5.124E-01	2.120E+02	1.424E-02	7.488E+03	5.636E-01
Carbon disulfide - HAP/VOC	7.786E-02	2.459E+01	1.652E-03	8.683E+02	8.564E-02
Carbon monoxide	6.914E+00	5.935E+03	3.988E-01	2.096E+05	7.606E+00
Carbon tetrachloride - HAP/VOC	1.086E-03	1.696E-01	1.139E-05	5.988E+00	1.194E-03
Carbonyl sulfide - HAP/VOC	5.190E-02	2.077E+01	1.396E-03	7.336E+02	5.709E-02
Chlorobenzene - HAP/VOC	4.962E-02	1.080E+01	7.121E-04	3.743E+02	5.458E-02
Chlorodifluoromethane	1.982E-01	5.511E+01	3.703E-03	1.946E+03	2.180E-01

Figura 5.7. Inventario de resultados para un año en concreto

Fuente: User's Manual LandGEM

5.4.9. Visualización e impresión del informe resumido

El informe resumido se puede visualizar en la hoja “Report”. La información contenida en el informe resumido en la hoja “Results” incluye:

- Una portada que muestra el título de LandGEM. El nombre o identificador del vertedero y una descripción, introducidos en la hoja “User Inputs”, la fecha actual, la ecuación de descomposición de primer orden u una descripción del modelo
- Los datos contenidos en la hoja “Input Review”, incluido las características del vertedero, los parámetros del modelo, gases/contaminantes seleccionados, ratio de aceptación de residuos y cantidades de residuos en el lugar
- Emisiones estimadas en formato gráfico
- Emisiones estimadas en formato tabular

Con todo lo expuesto anteriormente, se puede tener una idea global del funcionamiento de LandGEM. En este apartado, se han revisado todas y cada una de las hojas de trabajo que componen la herramienta, dando una explicación de la función y del funcionamiento de cada una de ellas.

El apartado 5, puede servir como un manual de usuario, que permite tener una idea de cómo funciona LandGEM. A simple vista, se puede observar que la herramienta necesita poca información sobre el vertedero, para llevar a cabo la estimación de la producción de biogás.

Por otro lado, una vez introducidos todos los datos para el cálculo, LandGEM proporciona un resumen de los mismos. Esto facilita al usuario, la comprobación de que todos los datos introducidos para el cálculo son los correctos.

Más adelante, LandGEM proporciona de manera gráfica y tabulada todos los resultados obtenidos, permitiendo al usuario elegir la mejor forma que desee para visualizar los resultados.

Por último, la herramienta permite ver los resultados obtenidos para un año en concreto, a seleccionar por el usuario, además la última hoja de trabajo proporciona un resumen de todos los resultados obtenidos.

Con todo esto, se puede pasar al siguiente apartado, donde se pondrá en práctica todos los conocimientos adquiridos hasta el momento sobre LandGEM.

[illegible]

Fuente: Plan Zonal de Residuos de las zonas X, XI y XII

45

Entre las poblaciones que constituyen el Plan Zonal se encuentran algunas de las más pobladas de la Comunidad Valencia, como Alzira, Xàtiva, Gandia, Oliva, Ontinyent o Cullera.

Los residuos que se esperan gestionar para el año horizonte se presentan a continuación.

RESIDUOS GESTIONADOS (año horizonte 2025)

▪ Materia orgánica	390.086 T/año	▪ Animales muertos	221.640 Kg/año
▪ Papel total	186.177 T/año	▪ Pilas	355 Kg/año
▪ Plástico	97.522 T/año	▪ Fluorescentes	35.462 Kg/año
▪ Vidrio	62.059 T/año	▪ Jardinería	6.206 Kg/año
▪ Metales férreos	26.597 T/año	▪ Voluminosos	11.089 T/año
▪ Metales no férreos	8.866 T/año	▪ RCD's	56.384 T/año
▪ Varios	115.253 T/año		

Figura 6.2. Residuos gestionados año horizonte (2025)

Fuente: Plan Zonal de Residuos de las zonas X, XI y XII

La propuesta de construcción de un vertedero, por el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana, que permita la gestión de residuos en las zonas X, XI y XII del Plan Zonal, se debe a la falta de una infraestructura capaz de gestionar el considerable aumento en la generación de residuos por parte de la población. En los últimos años, el aumento de la población y de su renta per cápita han provocado un incremento en la producción de residuos. Además, la sociedad ha ido adquiriendo, en los últimos tiempos, una sensibilidad especial frente a aquellos temas que tengan que ver con el medio ambiente, dado la importancia de protegerlo, para dejarles un buen legado a las generaciones futuras.

Por todo ello, es por lo que se plantea la necesidad de construir un vertedero, que permita una correcta gestión de los residuos producidos en las zonas X, XI y XII, del Plan Zonal.

6.1. Datos de partida

Los datos extraídos, para el cálculo de la producción de biogás, del Plan Zonal de Xàtiva han sido las cantidades anuales de RSU y la composición de los residuos. Con estos datos es posible emplear el método clásico y LandGEM, para estimar la producción de biogás en el vertedero.

Las cantidades anuales de RSU, obtenidas a partir de la información contenida en el “Pliego de cláusulas administrativas del contrato de concesión de la obra pública del proyecto de gestión de residuos urbanos de las zonas X, XI, y XII, área de gestión 2 de la Comunidad Valenciana” son las que se muestran en la tabla 6.1.

Por otro lado, la composición de los residuos se muestra en la tabla 6.2. Esta composición corresponde a una muestra de residuos entrantes en una planta de tratamiento de RSU de la Comunidad Valenciana, por lo que se puede entender como una muestra típica de los residuos producidos en la zona de estudio.

Tabla 6.1. Cantidades anuales de RSU (toneladas)

Año	Entradas anuales (t)
1	184010,33
2	185543,67
3	187077
4	188610,33
5	190143,67
6	191677
7	193210,33
8	194743,67
9	196277
10	197810,33

Tabla 6.2. Composición de los RSU

COMPONENTES	% Peso	Humedad
Restos de comida	24,4	50
Papel-cartón	13,8	5
Plásticos	17,7	2
Vidrio	6,2	0
Textiles	8,7	8
Goma	0	2
Cuero	0	8
Residuos de jardín	10	30
Madera	5,9	20
Metales férricos	0,9	0
Metales no férricos	0,6	0
Otros	11,8	2

A falta de un análisis elemental de los residuos producidos en la zona de estudio, se asume la hipótesis de que la composición de los RSU que se gestionarán en la futura instalación es una composición típica, obteniendo los valores recogidos en la tabla 6.3 de Tchobanoglous *et al.* (1993)

Tabla 6.3. Composición química de los RSU

COMPONENTES	C	H	O	N
Restos de comida	5,86	0,78	4,59	0,32
Papel-cartón	5,7	0,79	5,77	0,04
Residuos de jardín	2,01	0,25	1,6	0,14
Textiles	4,4	0,53	2,5	0,37
Goma	0	0	0	0
Cuero	0	0	0	0
Residuos de jardín	1,34	0,17	1,06	0,1
Madera	2,34	0,28	2,02	0,01

Con todo esto, ya se dispone de la información necesaria para estimar la producción de biogás en el futuro vertedero de RSU.

6.2. Aplicación del método clásico

Para la aplicación del método clásico se ha implementado una hoja de cálculo Excel, siguiendo la metodología descrita en el libro *“Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues”*.

En la hoja de trabajo, únicamente se deben introducir los datos expuestos anteriormente, las cantidades anuales de RSU y la composición de los residuos.

Tabla 6.4. Composición de los residuos en la hoja Excel

COMPONENTES	% Peso	Humedad
Restos de comida	24,4	50
Papel-cartón	13,8	5
Plásticos	17,7	2
Vidrio	6,2	0
Textiles	8,7	8
Goma	0	2
Cuero	0	8
Residuos de jardín	10	30
Madera	5,9	20
Metales férricos	0,9	0
Metales no férricos	0,6	0
Otros	11,8	2

Tabla 6.5. Composición química de la fracción RBD en la hoja Excel

COMPONENTES	Peso seco	Peso húmedo	C	H	O	N	S y cenizas
Restos de comida	12,2	12,2	5,86	0,78	4,59	0,32	
Papel-cartón	13,11	0,69	5,7	0,79	5,77	0,04	
Residuos de jardín	4,2	1,8	2,01	0,25	1,6	0,14	
TOTAL	29,51	14,69	13,57	1,82	11,96	0,50	0
Número de moles	-	-	1,13	1,82	0,75	0,04	-
Número entero de moles	-	-	31,66	50,96	20,93	1,00	-

Una vez introducidos los datos de partida, la hoja proporciona los coeficientes de la ecuación estequiométrica empleada y la cantidad total de biogás generado por kilogramo de RSU.

Tabla 6.6. Coeficientes de la ecuación estequiométrica de la fracción RBD

Coeficiente CH₄=	17
Coeficiente CO₂=	15
Coeficiente NH₃=	1

Total biogás producido por kg de RSU=	0,90	m ³ /kg RSU
--	------	------------------------

Figura 6.3. Biogás producido por la fracción RBD

Los resultados presentados anteriormente se corresponden con la fracción RBD de los residuos. A continuación, se presentan los resultados de la fracción LBD.

Tabla 6.7. Coeficientes de la ecuación estequiométrica de la fracción LBD

Coeficiente CH₄=	10
Coeficiente CO₂=	9
Coeficiente NH₃=	1

Total biogás producido por kg de RSU=	0,99	m ³ /kg RSU
--	------	------------------------

Figura 6.4. Biogás producido por la fracción LBD

También se deben tener en cuenta un par de consideraciones de la hoja Excel. Por un lado, se considera que el tiempo que tardan en descomponerse los residuos RBD y los

LBD es de 5 y 15 años, respectivamente. Por otro lado, la parte de los residuos RBD y LBD que se degradan realmente es del 75 y 50 %, respectivamente.

Por último, se emplea el método triangular para obtener la cantidad total de biogás producido al año en el vertedero. Estos resultados se presentan gráficamente a continuación.

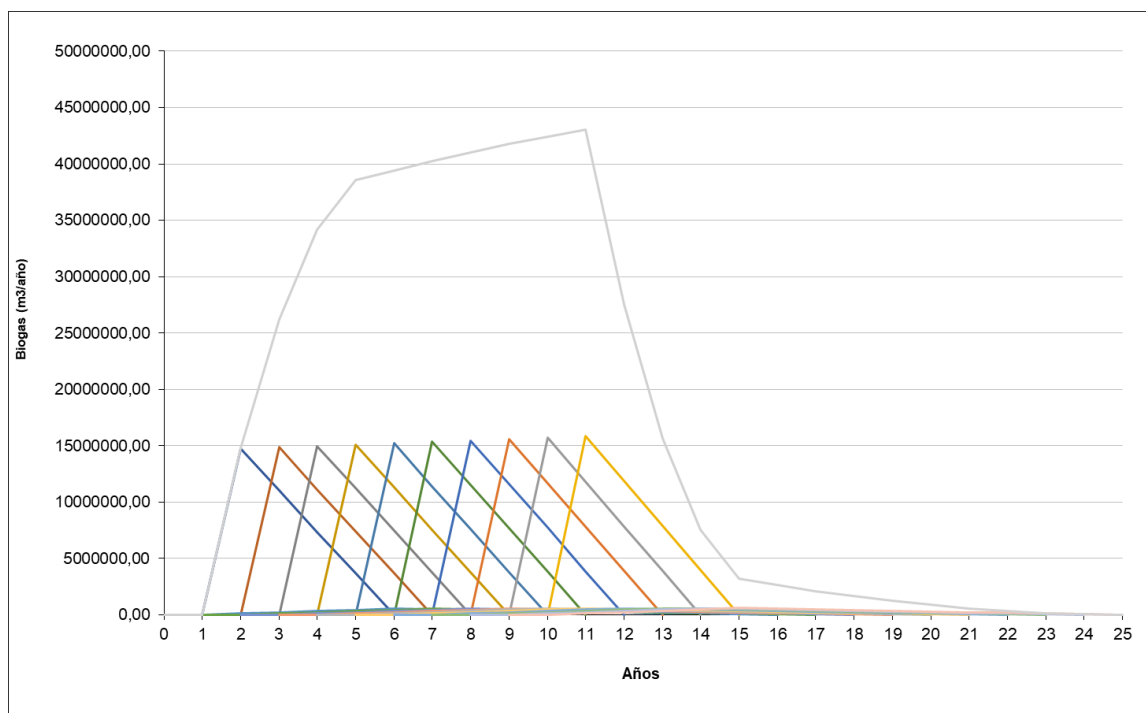


Figura 6.5. Producción de biogás

En la figura 6.3. se pueden ver representados, la cantidad total de biogás generado por la fracción RBD y la fracción LBD, y la suma de ambas. Se puede comprobar que la producción máxima se alcanza en el año 11, y es de unos 43 millones de metros cúbicos de biogás.

6.3. Aplicación del método LandGEM

LandGEM es una herramienta, en formato Excel, facilitada por la Agencia Medio Ambiental de los Estados Unidos, para estimar la producción de biogás en vertederos. La descripción de este modelo se ha desarrollado en capítulos anteriores.

Para proceder a su uso, únicamente es necesario introducir las cantidades anuales de RSU que acepta el vertedero (Tabla 6.8), y el año de apertura y de clausura del mismo (Figura 6.6.)

Por otra parte, se ha considerado que el vertedero se encuentra en una zona árida, característica geográfica que se corresponde bastante bien con la ubicación del futuro vertedero en estudio, por lo que los parámetros seleccionados en LandGEM han sido los proporcionados por la CAA para zonas áridas.

Landfill Open Year	2020
Landfill Closure Year	2029
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No
Waste Design Capacity	

Figura 6.6. Años de apertura y clausura del vertedero

Tabla 6.8. Cantidades anuales de RSU

Year	Input Units (Mg/year)
2020	184.010
2021	185.544
2022	187.077
2023	188.610
2024	190.144
2025	191.677
2026	193.210
2027	194.744
2028	196.277
2029	197.810

Las cantidades de residuos depositados en el vertedero son las extraídas del Pliego de Condiciones antes mencionado, en el que se recogen las características principales de operación de la instalación futura.

Una vez introducidos los datos de partida, sólo queda seleccionar los gases de los que se desea conocer las emisiones que se generarán en el vertedero y los parámetros de cálculo (Figura 6.7.)

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1 Default pollutant parameters are currently being used by model.

Total landfill gas

Gas / Pollutant #2

Methane

Gas / Pollutant #3

Carbon dioxide

Gas / Pollutant #4

NMOC

Edit Existing or Add New Pollutant Parameters

Restore Default Pollutant Parameters

Figura 6.7. Selección de los gases

Como se ha apuntado anteriormente, los parámetros seleccionados han sido los de la CAA, para zonas áridas.

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS Parameters

Methane Generation Rate, k (year^{-1})

CAA Arid Area - 0.02

Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)

CAA Arid Area - 170

NMOC Concentration (ppmv as hexane)

CAA - 4,000

Methane Content (% by volume)

CAA - 50% by volume

Figura 6.8. Parámetros CAA Zona Árida

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.9. La máxima producción de biogás se alcanza en el décimo primer año y tiene un valor de casi 12 millones de metros cúbicos. Al considerar que el biogás está formado por un 50% de metano y un 50% de dióxido de carbono, ambas producciones coinciden, por lo que sólo se percibe una línea en la figura.

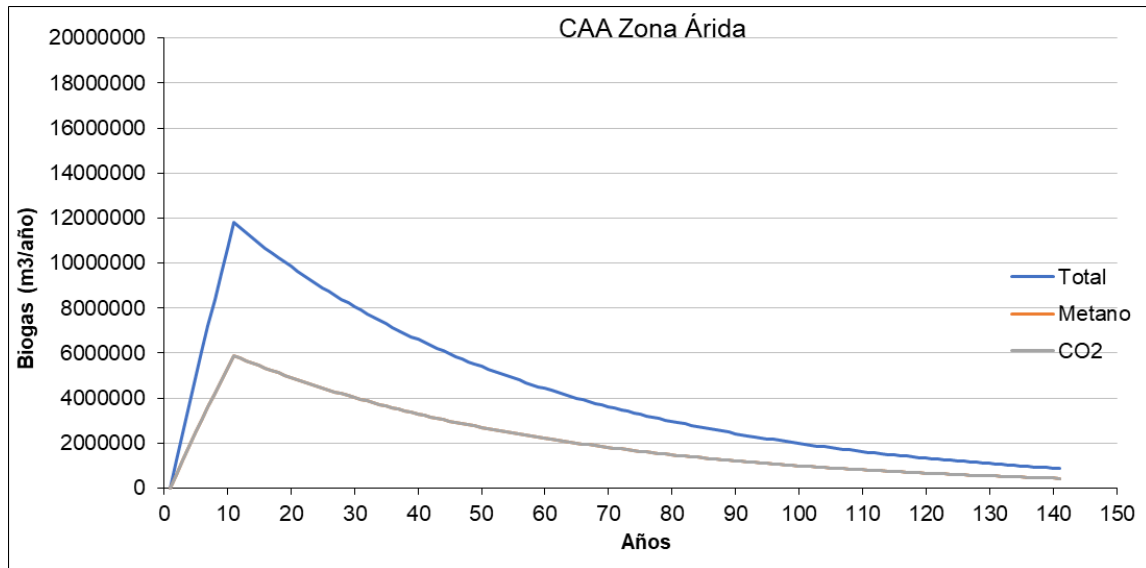


Figura 6.9. Biogás obtenido con los parámetros CAA Zona Árida

6.4. Análisis de sensibilidad de parámetros

En este apartado se van a presentar distintos escenarios, en los que se va a intentar averiguar la sensibilidad de LandGEM al modificar los valores de dos de los parámetros considerados en el cálculo del biogás. Dichos parámetros son la ratio de generación de metano (k) y la capacidad potencial de generación de metano (L_0).

Los escenarios que se van a estudiar son los recogidos en la tabla 6.9.

Tabla 6.9. Escenarios

	k (año ⁻¹)			
		0,2	0,5	0,7
L_0 (m³/t)	60	Escenario 1	Escenario 4	Escenario 7
	100	Escenario 2	Escenario 5	Escenario 8
	170	Escenario 3	Escenario 6	Escenario 9

Hay que tener en cuenta que la hipótesis considerada estima que el biogás está compuesto a partes iguales por metano y dióxido de carbono. Por tanto, en las gráficas resultantes tan sólo se apreciará una línea, correspondiente a la producción de cada uno de esos dos componentes, ya que ambas se superponen.

Escenario 1

El parámetro k presenta un valor de $0,2 \text{ año}^{-1}$ y, L_0 de $60 \text{ m}^3/\text{t}$.

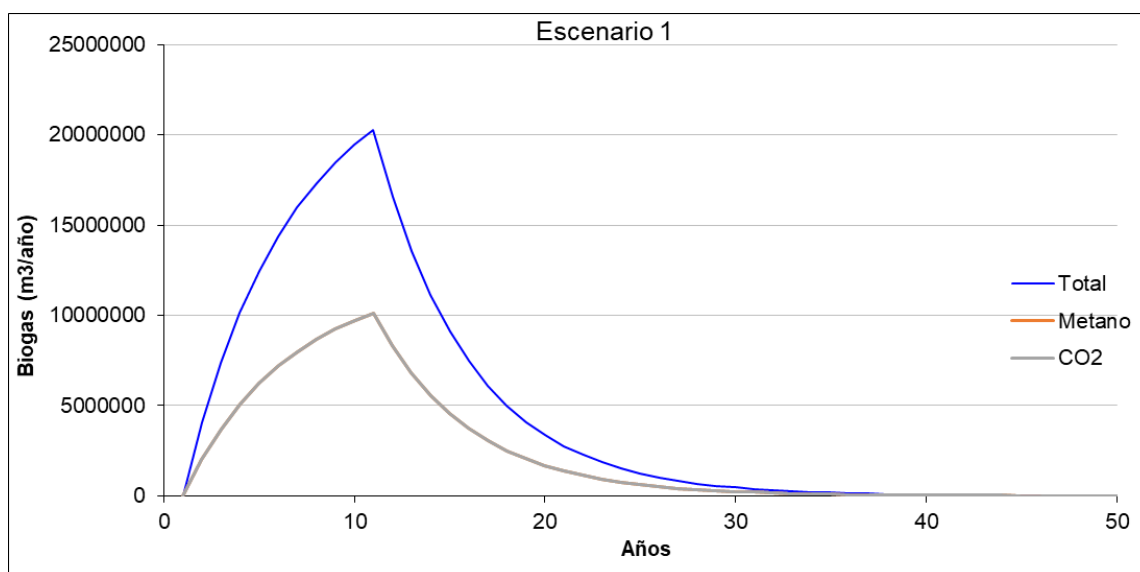


Figura 6.10. Escenario 1

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 20 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Escenario 2

El parámetro k presenta un valor de $0,2 \text{ año}^{-1}$ y, L_0 de $100 \text{ m}^3/\text{t}$.

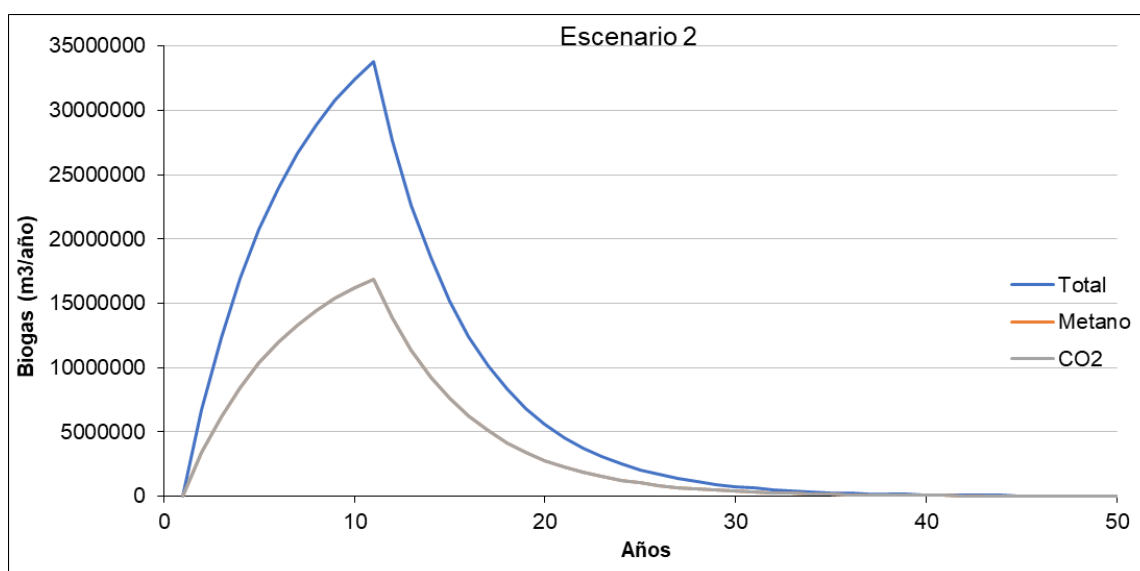


Figura 6.11. Escenario 2

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 34 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Escenario 3

El parámetro k presenta un valor de $0,2 \text{ año}^{-1}$ y, L_0 de $170 \text{ m}^3/\text{t}$.

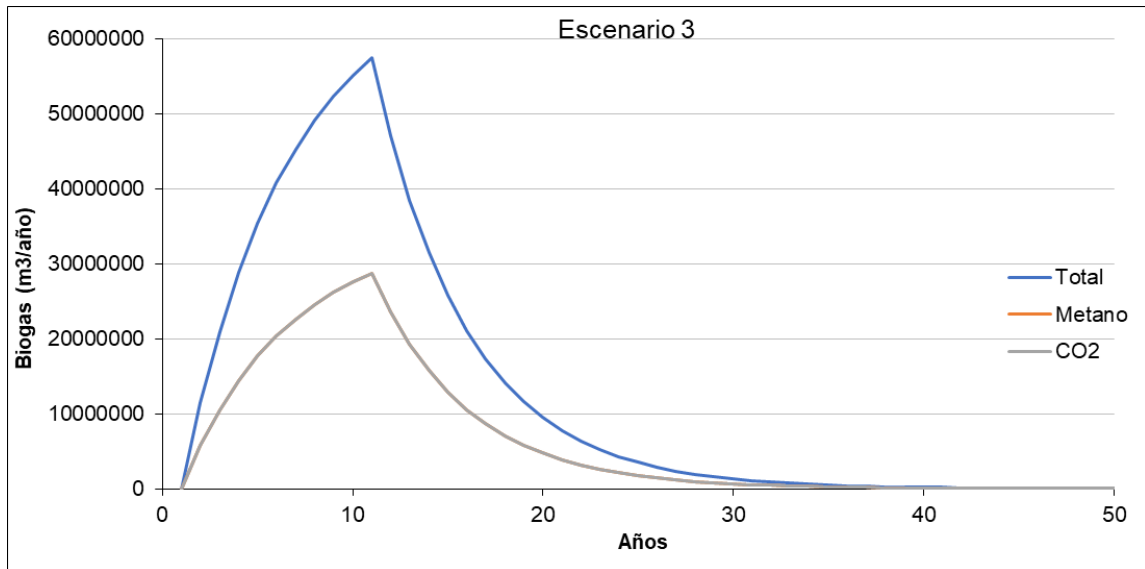


Figura 6.12. Escenario 3

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 57 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Escenario 4

El parámetro k presenta un valor de $0,5 \text{ año}^{-1}$ y, L_0 de $60 \text{ m}^3/\text{t}$.

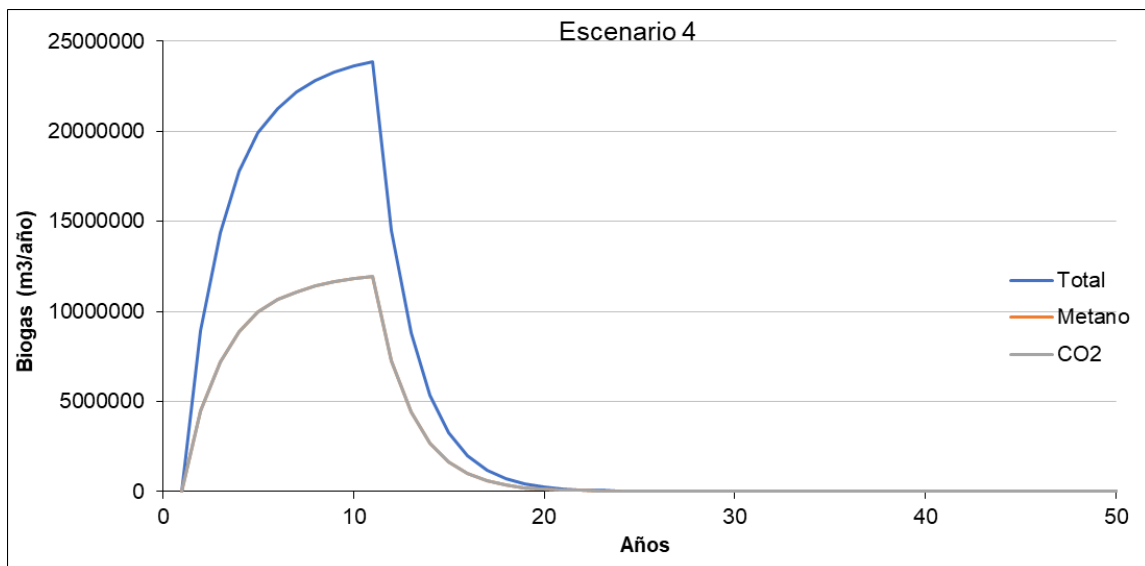


Figura 6.13. Escenario 4

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 24 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Escenario 5

El parámetro k presenta un valor de $0,5 \text{ año}^{-1}$ y, L_0 de $100 \text{ m}^3/\text{t}$.

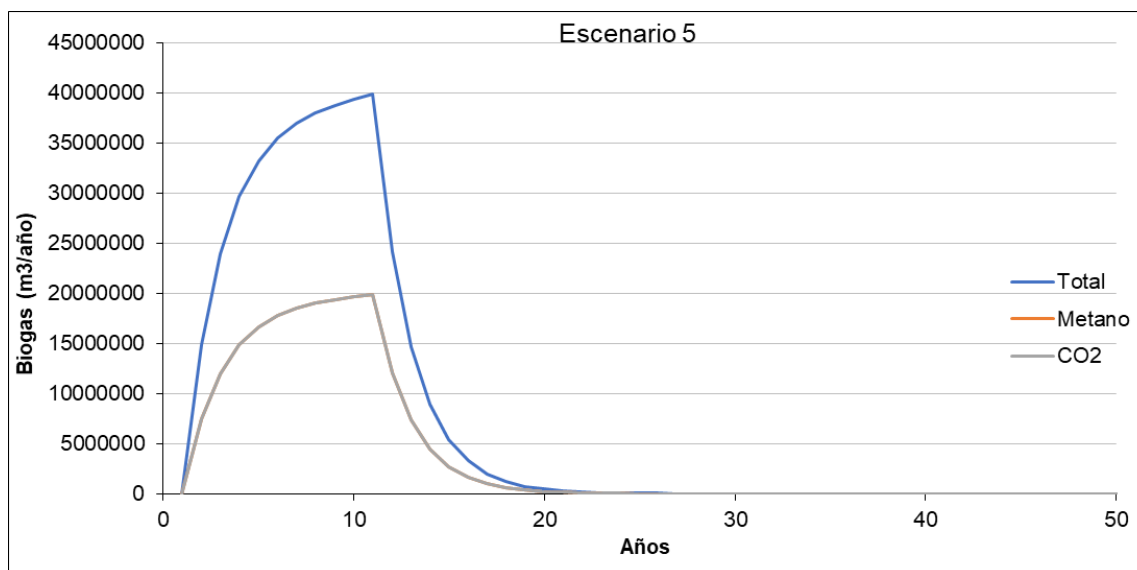


Figura 6.14. Escenario 5

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 40 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Escenario 6

El parámetro k presenta un valor de $0,5 \text{ año}^{-1}$ y, L_0 de $170 \text{ m}^3/\text{t}$.

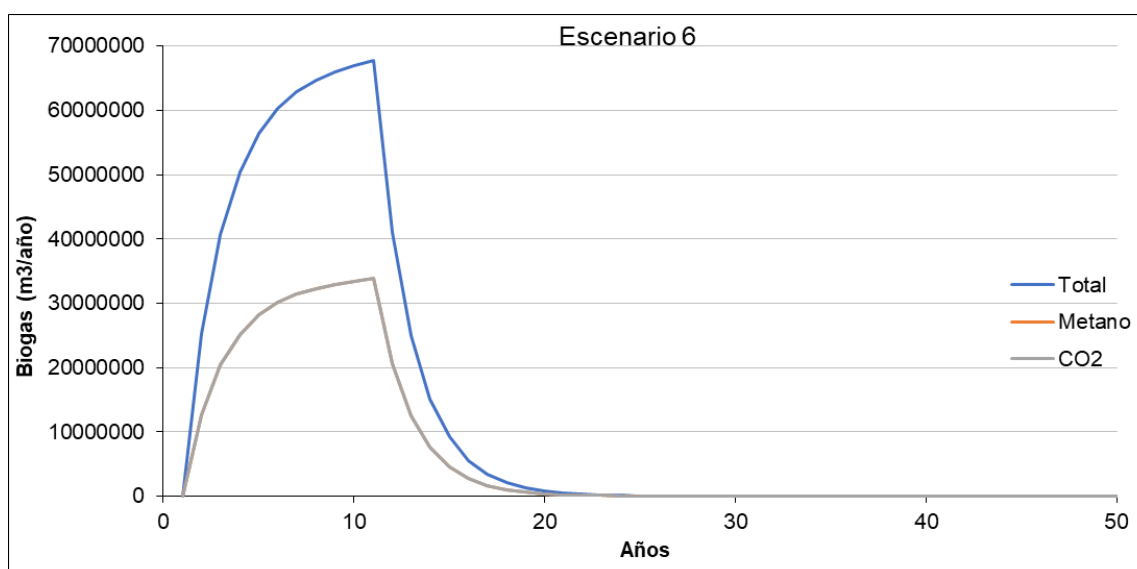


Figura 6.15. Escenario 6

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 70 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Escenario 7

El parámetro k presenta un valor de $0,7 \text{ año}^{-1}$ y, L_0 de $60 \text{ m}^3/\text{t}$.

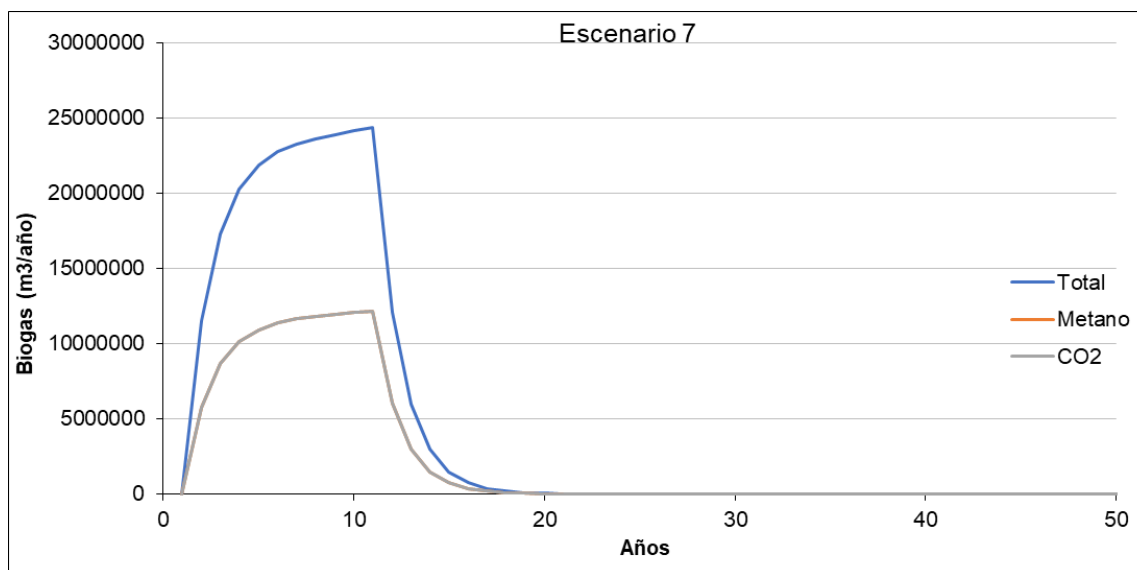


Figura 6.16. Escenario 7

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 24 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Escenario 8

El parámetro k presenta un valor de $0,7 \text{ año}^{-1}$ y, L_0 de $100 \text{ m}^3/\text{t}$.

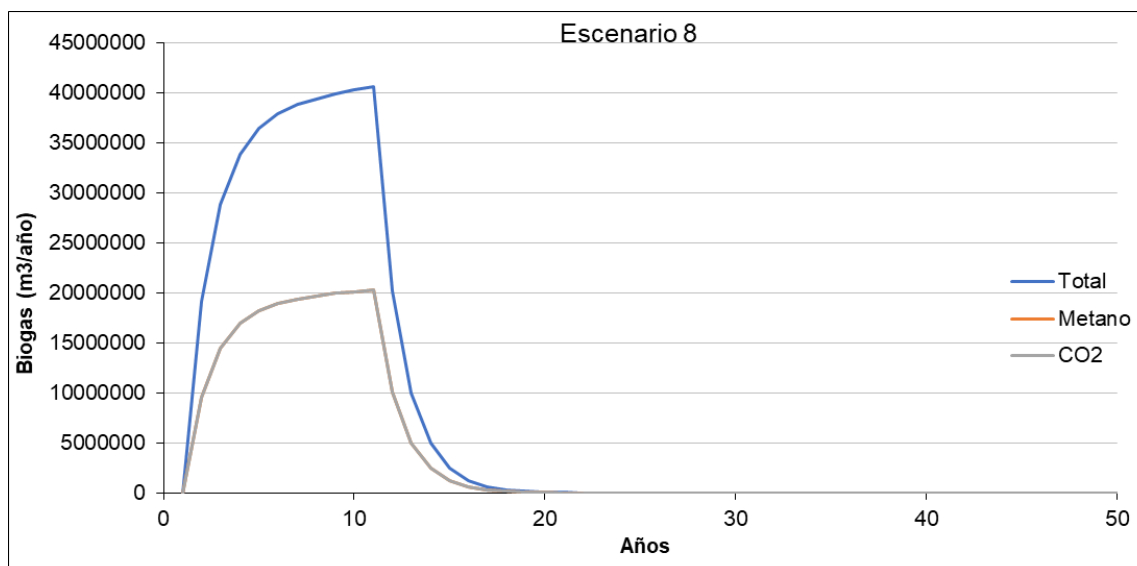


Figura 6.17. Escenario 8

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 40 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Escenario 9

El parámetro k presenta un valor de $0,7 \text{ año}^{-1}$ y L_0 de $170 \text{ m}^3/\text{t}$.

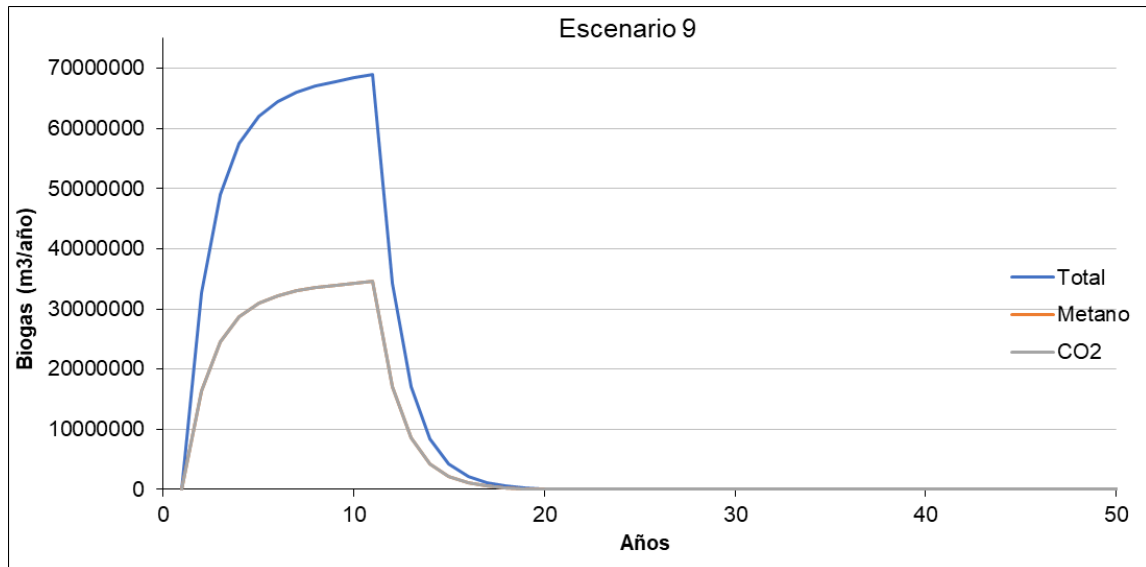


Figura 6.18. Escenario 9

El valor máximo obtenido para la producción de biogás es de unos 70 millones de metros cúbicos, y se alcanza en el décimo primer año.

Una vez realizados todos los escenarios, se presentan todos los resultados obtenidos para la producción total de biogás, en una misma gráfica, que ayude a entender la sensibilidad de LandGEM a los parámetros k y L_0 . De esta manera, en la gráfica 6.19 se representan conjuntamente los resultados obtenidos por cada uno de los nueve escenarios planteados con LandGEM con los resultados obtenidos al utilizar el método clásico de degradación completa.

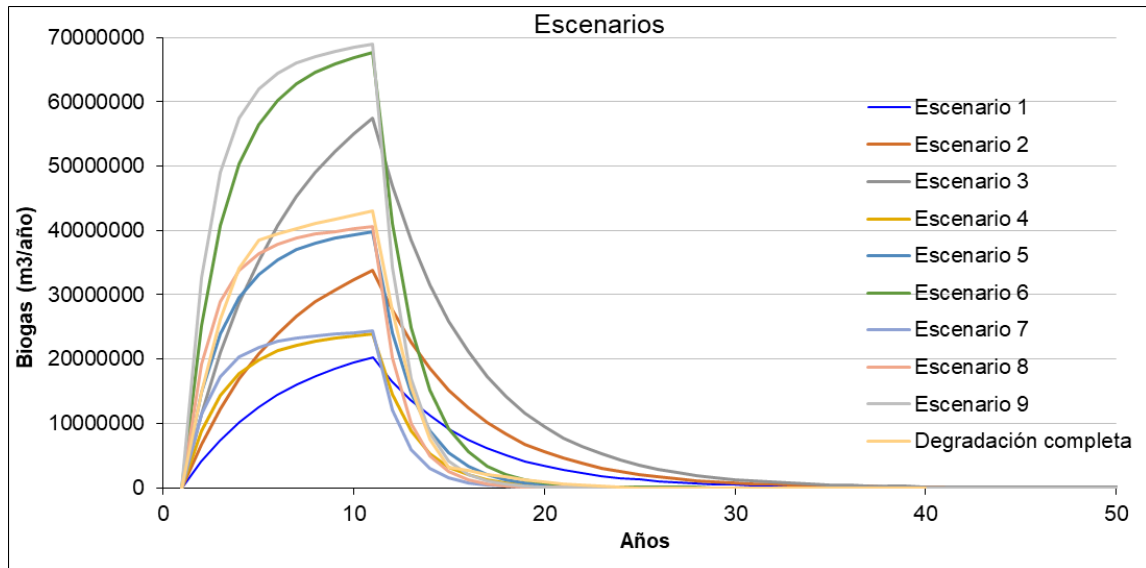


Figura 6.19. Escenarios

Como puede observarse en la figura 6.19, los valores del coeficiente k afectan a la velocidad a la que se genera el biogás. A medida que k aumenta, se produce un incremento en la velocidad de la producción de biogás. Por lo tanto, en los primeros años se genera una mayor cantidad de biogás en comparación con los últimos años de explotación de la instalación.

Por otro lado, la variación del parámetro L_0 , afecta principalmente al pico que se alcanza en la producción de biogás. Cuanto mayor es el valor de L_0 , mayor es el pico de producción alcanzado.

En resumen, podría decirse que en el parámetro k afecta a la forma que toma la gráfica de producción de biogás, y L_0 afecta al pico que se alcanza en la misma.

Además, se puede destacar que los resultados obtenidos por el método de degradación completa quedan englobados entre los resultados obtenidos en los diferentes escenarios de simulación de LandGEM. De esos escenarios, son el escenario cinco ($k = 0,5 \text{ año}^{-1}$, $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{t}$) y ocho ($k = 0,7 \text{ año}^{-1}$, $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{t}$), los que tienen la forma y el pico más similares a los obtenidos con el método de degradación completa.

7. CONCLUSIONES

El presente Trabajo Final de Máster compara dos modelos matemáticos para el cálculo de la producción de biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos, el modelo de degradación completa y LandGEM.

Puede decirse que, una de las principales ventajas de emplear LandGEM es la rapidez con la que se puede ejecutar, a diferencia del modelo de degradación completa, que requiere de un proceso más laborioso para poder emplearse, así como una mayor cantidad de información, que muchas veces no está disponible.

Además de lo anteriormente expuesto, se han llegado a una serie de conclusiones sobre las ventajas e inconvenientes del uso del modelo de degradación completa y de LandGEM, que se recogen en la tabla 7.1.

A la vista de los resultados obtenidos podemos afirmar que el modelo de degradación completa es un modelo más complejo que LandGEM, tal cual queda de manifiesto al comparar cada uno de los siguientes aspectos de análisis:

- **Climatología:** El modelo de degradación completa incorpora datos de precipitación y de evapotranspiración para calcular la infiltración efectiva que accede al vaso de vertido. El modelo LandGEM lleva incorporados una serie de valores para zonas previamente calificadas como húmedas o secas, pero no permite integrar valores medidos de precipitación o evapotranspiración en la simulación.
- **Cantidad de residuos:** Ambos modelos consideran en la simulación la cantidad de residuos que se incorpora al vertedero.
- **Contenido en humedad:** El modelo de degradación completa evalúa el contenido en humedad de los residuos a lo largo del periodo de simulación. El modelo LandGEM no considera este parámetro para realizar la simulación.
- **Composición química:** El modelo de degradación completa se fundamenta en el establecimiento de la reacción estequiométrica de degradación completa de la fracción orgánica de los residuos, necesitando para ello del conocimiento previo del análisis químico elemental de los mismos. El modelo LandGEM no considera la composición química real de la muestra.

Conclusiones

Tabla 7.1. Conclusiones

Datos	Modelo de degradación completa	LandGEM	Comentarios
Climatología	✓	✓	LandGEM lleva incorporados una serie de parámetros para zonas convencionales y zonas húmedas
Cantidad de residuos	✓	✓	Ambos modelos requieren la cantidad de residuos que se depositan al año en el vertedero
Contenido en humedad	✓	✗	El modelo de degradación completa necesita el contenido de humedad de los residuos
Composición química	✓	✗	El modelo de degradación completa necesita la composición química de los residuos
Residuos RBD	✓	✗	El modelo de degradación completa distingue los residuos RBD
Residuos LBD	✓	✗	El modelo de degradación completa distingue los residuos LBD
Peso específico CH ₄	✓	✗	El modelo de degradación completa precisa el peso específico del metano
Peso específico CO ₂	✓	✗	El modelo de degradación completa precisa el peso específico del dióxido de carbono
Tiempo descomposición residuos	✓	✗	LandGEM no considera el tiempo de degradación de los residuos. El modelo de degradación completa considera el tiempo de degradación de los residuos RBD y de los LBD
Parte de los residuos que degradan	✓	✗	El modelo de degradación completa tiene en cuenta un porcentaje de descomposición de los residuos RBD y de los LBD

- Velocidad de degradación de los residuos: el modelo de degradación completa distingue entre los residuos rápidamente biodegradables (RBD) y los lentamente biodegradables (LBD), calculando independientemente la producción de biogás para cada uno de ellos y combinándolas mediante un proceso de convolución. La distinción entre ambos tipos de residuo debe ser facilitada por el usuario. El modelo LandGEM no realiza esta distinción, estimando la producción de biogás a partir de una composición preestablecida de residuos.
- Características del biogás de vertedero: el modelo de descomposición completa precisa de estimar las características (peso específico) de las distintas componentes del biogás de vertedero (fundamentalmente CH₄ y CO₂). El modelo LandGEM no considera estos parámetros para realizar la simulación.

- Eficiencia en la biodegradación: el modelo de degradación completa permite ajustar los resultados simulados con los realmente obtenidos mediante la consideración de un parámetro que considera la eficiencia de la biodegradación de forma independiente para los RBD y para los LBD

Se ha logrado realizar con éxito la estimación de la producción de biogás en un caso real con ambos métodos. El vertedero analizado corresponde al que albergará los rechazos de la futura instalación de valorización de residuos urbanos que deberá construirse para dar servicio a las Zonas X, XI y XII (Área de Gestión 2) del Plan Zonal de Residuos de la Comunidad Valenciana.

Los resultados obtenidos por el método de degradación completa quedan englobados entre los resultados obtenidos en los diferentes escenarios de simulación de LandGEM. De esos escenarios, son el escenario cinco ($k = 0,5 \text{ año}^{-1}$, $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{t}$) y ocho ($k = 0,7 \text{ año}^{-1}$, $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{t}$), los que tienen la forma y el pico más similares a los obtenidos con el método de degradación completa.

De esta manera, se ha podido comprobar que el método de degradación completa permite obtener mejores resultados más realistas, puesto que incorpora en su planteamiento un proceso de calibración de parámetros más realista. El modelo LandGEM permite aproximar los resultados del modelo de degradación completa en el caso de escoger adecuadamente los valores de los parámetros k y L_0 , lo cual no puede justificarse adecuadamente sino únicamente aproximarse en casos reales.

Por ello, se aconseja que, en el caso en que se utilice el modelo LandGEM, su aplicación vaya asociada con un análisis de sensibilidad de los parámetros k y L_0 y no admitiendo únicamente una única combinación de estos parámetros.

Conclusiones

9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El principal problema que se puede encontrar a la hora de proceder a calcular el biogás generado en vertederos de RSU está relacionado con las fases de calibración y verificación del modelo utilizado, dado que habitualmente no se poseen datos reales de generación de biogás en vertederos reales. Esto genera que los modelos existentes no puedan ser calibrados de la forma correcta, generando cierta incertidumbre a la hora de seleccionar los parámetros del modelo.

Por otro lado, dada su importancia e impacto en los resultados del modelo en casos reales se debería comprobar la caracterización de los residuos y su análisis químico elemental. Es conocido que en proyectos reales los datos utilizados para predecir la producción de biogás proceden de datos bibliográficos que podrían no coincidir con los datos reales de la zona de estudio.

Por tanto, uno de los principales problemas a solventar sería que las administraciones proporcionaran datos reales de los vertederos, cosa que mejoraría la situación actual, ya que, dichos datos podrían servir para calibrar los modelos de la forma correcta.

10. REFERENCIAS

Alexander, A.; Burklin, C.; Singleton, A. (2005). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development.

Cabildo, M.P.; Claramunt, R.M.; Cornago, M.P.; *et al.* (2008). Reciclado y Tratamiento de Residuos. Ciencias ambientales. UNED.

Camargo, Y.; Vélez, A. (2009). Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos (VSIIR-REDIS).

García-Darás, F.; Colomer-Mendoza, F.J.; Robles-Martínez, F.; Aranda, G. (2013). Análisis comparativo entre los modelos de generación de biogás aplicados a las emisiones de un relleno sanitario en México. V Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos (VSIIR-REDIS).

Jacobs, J.; Scharff, H. (2001). Comparison of methane emission models and methane emission measurements, NV Afvalzorg. Netherlands.

Jacobs, J.; Scharff, H. (2006). Applying guidance for methane emission estimation for landfills, NV Afvalzorg. Netherlands.

Kamalan, H.; Sabour, M.; Shariatmadari, N. (2011). A Review on Available Landfill Gas Models. Journal of Environmental Science and Technology 4 (2):79-92.

Plan Zonal de Residuos de las Zonas X, XI y XII, área de gestión 2 de la Comunidad Valenciana.

Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero

Rezaee, R.; Nasser, S.; Mahvi, A.H.; Jafari, A.; Mazloomi, S.; Gavami, A.; Yaghmaeian, K. (2014). Estimation of gas emission released from a municipal solid waste landfill site through a modeling approach: A case study (Sanandaj City, Iran). Journal of Advances in Environmental Health Research 2(1): 13-21.

Rodrigo Clavero, M.E. (2016). BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU. Trabajo Final de Máster MIHMA. Universitat Politècnica de València.

Rodrigo Ilarri, J., Rodrigo Clavero, M.E. y Fernández González, J.M. (2014). Alternativas de Valorización y Eliminación de Residuos Sólidos Urbanos. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Referencias

Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S.A. (1993). Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill, New York, USA.

Wells, A.N.; Crooks, M.E. (1987). Solid Waste Landfill Design Manual. Parametrix, Inc. Washington State Department of Ecology. GTS Section. Olympia. Washington.

ANEXO I

MÉTODO DE DEGRADACIÓN COMPLETA

COMPONENTES	% Peso	Humedad
Restos de comida	24,4	50
Papel-cartón	13,8	5
Plásticos	17,7	2
Vidrio	6,2	0
Textiles	8,7	8
Goma	0	2
Cuero	0	8
Residuos de jardín	10	30
Madera	5,9	20
Metales férricos	0,9	0
Metales no férricos	0,6	0
Otros	11,8	2

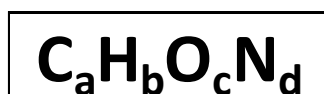
Parte RBD de los residuos de jardín= 60 %

Peso de la parte RBD de los residuos de jardín= 6 kg

COMPONENTES	Peso seco	Peso húmedo	C	H	O	N	S y cenizas
Restos de comida	12,2	12,2	5,86	0,78	4,59	0,32	
Papel-cartón	13,11	0,69	5,7	0,79	5,77	0,04	
Residuos de jardín	4,2	1,8	2,01	0,25	1,6	0,14	
TOTAL	29,51	14,69	13,57	1,82	11,96	0,50	0
Número de moles	-	-	1,13	1,82	0,75	0,04	-
Número entero de moles	-	-	31,66	50,96	20,93	1,00	-

C=	12
H=	1
O=	16
N=	14
CH ₄ =	16
CO ₂ =	44
NH ₃ =	17

a=	32
b=	51
c=	21
d=	1



Peso molecular de la fracción biodegradable=	779,8	gr/mol
--	-------	--------

$$C_aH_bO_cN_d + \left(\frac{4a - b - 2c + 3d}{4} \right) H_2O \rightarrow \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8} \right) CH_4 + \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8} \right) CO_2 + dNH_3$$

Coeficiente CH ₄ =	17
Coeficiente CO ₂ =	15
Coeficiente NH ₃ =	1

1 mol de m.o →	17	moles de CH ₄ +	15	moles de CO ₂ +	1	mol de NH ₃
----------------	----	----------------------------	----	----------------------------	---	------------------------

gr de m.o →	265,51	gr de CH ₄
	663,04	gr de CO ₂
	17	gr de NH ₃

100 kg de RSU en el vertedero →	10,05	kg de CH ₄
	25,09	kg de CO ₂
	0,64	kg de NH ₃

PESOS ESPECÍFICOS		
CH ₄	0,718	kg/m ³
CO ₂	1,977	kg/m ³

Biogás generado por cada 100 kg de RSU →	13,99	m ³ de CH ₄
	12,69	m ³ de CO ₂
Total biogás producido por kg de RSU=	0,90	m ³ /kg RSU

Parte LBD de los residuos de jardín=

40 %

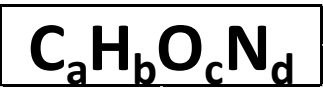
Peso de la parte LBD de los residuos de jardín=

4 kg

COMPONENTES	Peso seco	Peso húmedo	C	H	O	N	S y cenizas
Textiles	8,004	0,696	4,4	0,53	2,5	0,37	
Goma	0	0	0	0	0	0	
Cuero	0	0	0	0	0	0	
Residuos de jardín	2,8	1,2	1,34	0,17	1,06	0,1	
Madera	4,72	1,18	2,34	0,28	2,02	0,01	
TOTAL	15,524	3,076	8,08	0,98	5,58	0,48	0,00
Número de moles	-	-	0,67	0,98	0,35	0,03	-
Número entero de moles	-	-	19,64	28,58	10,17	1,00	-

C=	12
H=	1
O=	16
N=	14
CH ₄ =	16
CO ₂ =	44
NH ₃ =	17

a=	20
b=	29
c=	10
d=	1



Peso molecular de la fracción biodegradable=	441	gr/mol
--	-----	--------

$$C_aH_bO_cN_d + \left(\frac{4a - b - 2c + 3d}{4}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8}\right)CO_2 + dNH_3$$

Coeficiente CH ₄ =	10
Coeficiente CO ₂ =	9
Coeficiente NH ₃ =	1

1 mol de m.o →	10	moles de CH ₄ +	9	moles de CO ₂ +	1	mol de NH ₃
----------------	----	----------------------------	---	----------------------------	---	------------------------

441	gr de m.o	→	167,59	gr de CH ₄
			403,24	gr de CO ₂
			17,00	gr de NH ₃

100 kg de RSU en el vertedero	→	5,90	kg de CH ₄
		14,19	kg de CO ₂
		0,60	kg de NH ₃

PESOS ESPECÍFICOS		
CH ₄	0,718	kg/m ³
CO ₂	1,977	kg/m ³

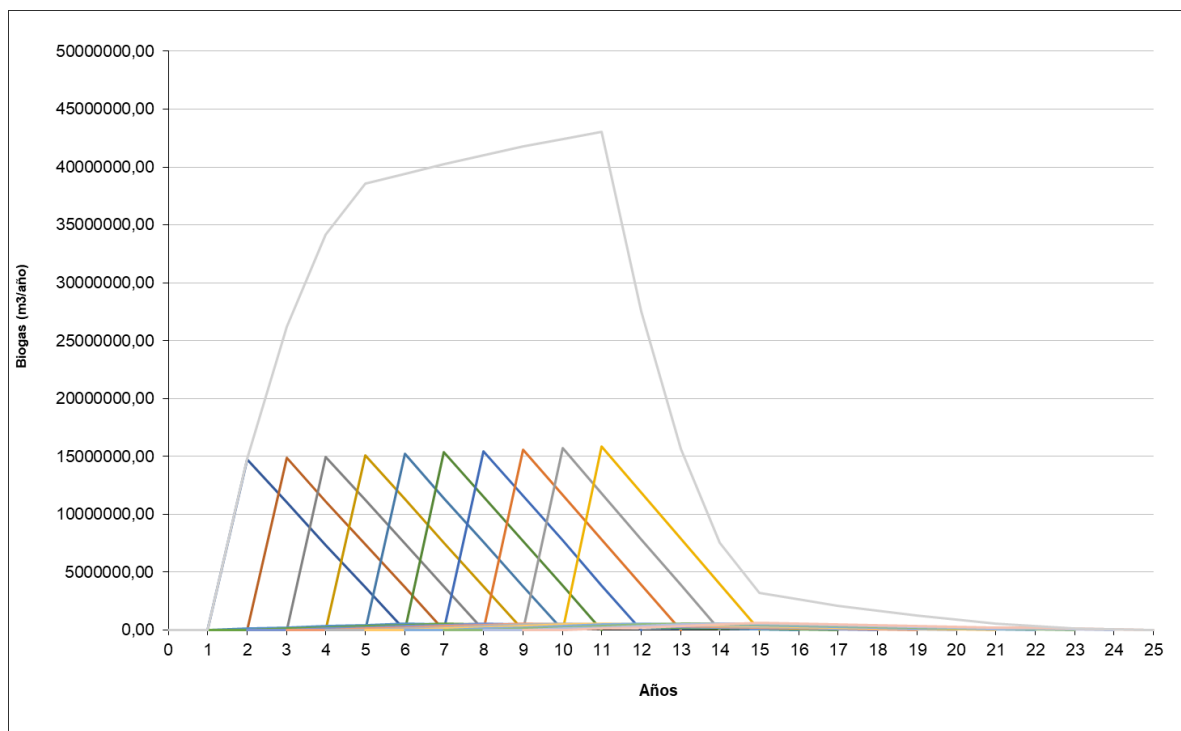
Biogás generado por cada 100 kg de RSU				→	8,22	m ³ de CH ₄
					7,18	m ³ de CO ₂
Total biogás producido por kg de RSU=					0,99	m ³ /kg RSU

Tiempo que tardan en descomponerse los residuos RBD	5	años
Tiempo que tardan en descomponerse los residuos LBD	15	años

Parte de los RRB que se degradan	75	%
Parte de los LRB que se degradan	50	%

Biogás producido por los residuos RBD	0,90	m ³ /kg RSU
Biogás producido por los residuos LBD	0,99	m ³ /kg RSU

TOTAL
0,00
0,00
14842742,53
26237824,31
34155484,87
38565964,75
39439505,30
40261953,20
41032844,21
41751714,69
42418099,19
43031533,45
27511985,00
15683814,21
7576316,27
3218786,21
2640519,05
2117988,60
1651659,30
1241995,60
889461,94
594522,78
357642,56
179285,73
59916,72
0,00



ANEXO II

LandGEM

Landfill Open Year	2020
Landfill Closure Year	2029
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No
Waste Design Capacity	

Year	Input Units (Mg/year)
2020	184.010
2021	185.544
2022	187.077
2023	188.610
2024	190.144
2025	191.677
2026	193.210
2027	194.744
2028	196.277
2029	197.810

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1		<p>Default pollutant parameters are currently being used by model.</p> <p>Edit Existing or Add New Pollutant Parameters</p> <p>Restore Default Pollutant Parameters</p>
Total landfill gas		
Gas / Pollutant #2		
Methane		
Gas / Pollutant #3		
Carbon dioxide		
Gas / Pollutant #4		
NMOC		

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

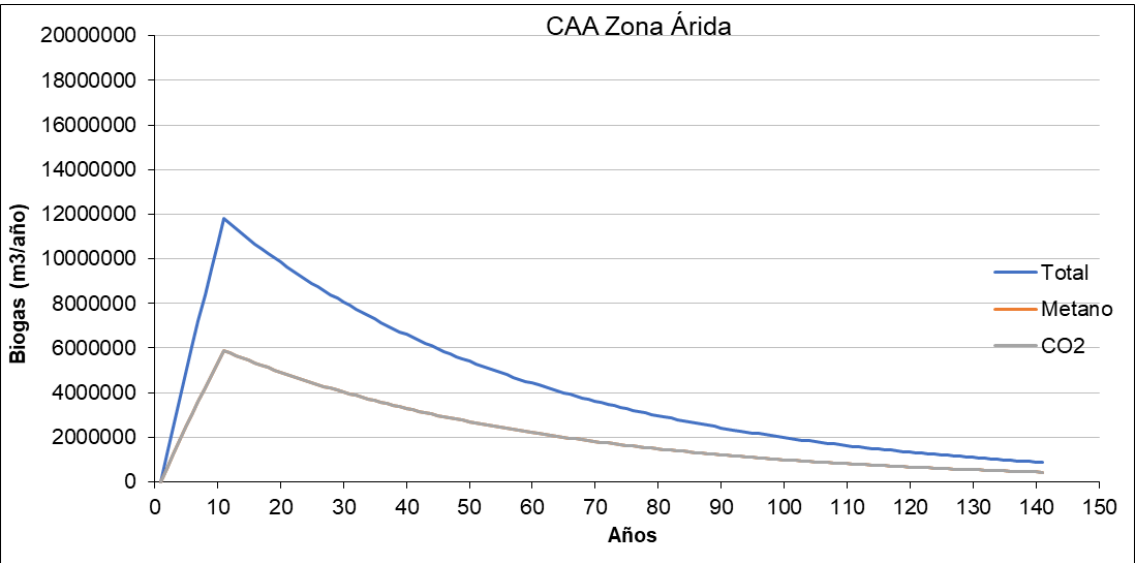
Parameters

Methane Generation Rate, k (year^{-1})
CAA Arid Area - 0.02

Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)
CAA Arid Area - 170

NMOC Concentration (*ppmv as hexane*)
CAA - 4,000

Methane Content (% by volume)
CAA - 50% by volume



	k (año ⁻¹)			
L ₀ (m ³ /t)		0,2	0,5	0,7
	60	Escenario 1	Escenario 4	Escenario 7
	100	Escanario 2	Escanario 5	Escanario 8
	170	Escenario 3	Escenario 6	Escenario 9

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Parameters

Methane Generation Rate, k (year^{-1})

User-specified ▼

User-specified value: 0,200

User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.

Potential Methane Generation Capacity, L_o (m^3/Mg)

User-specified ▼

User-specified value: 60

User-specified L_o value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.

NMOC Concentration (ppmv as hexane)

CAA - 4,000 ▼

Methane Content (% by volume)

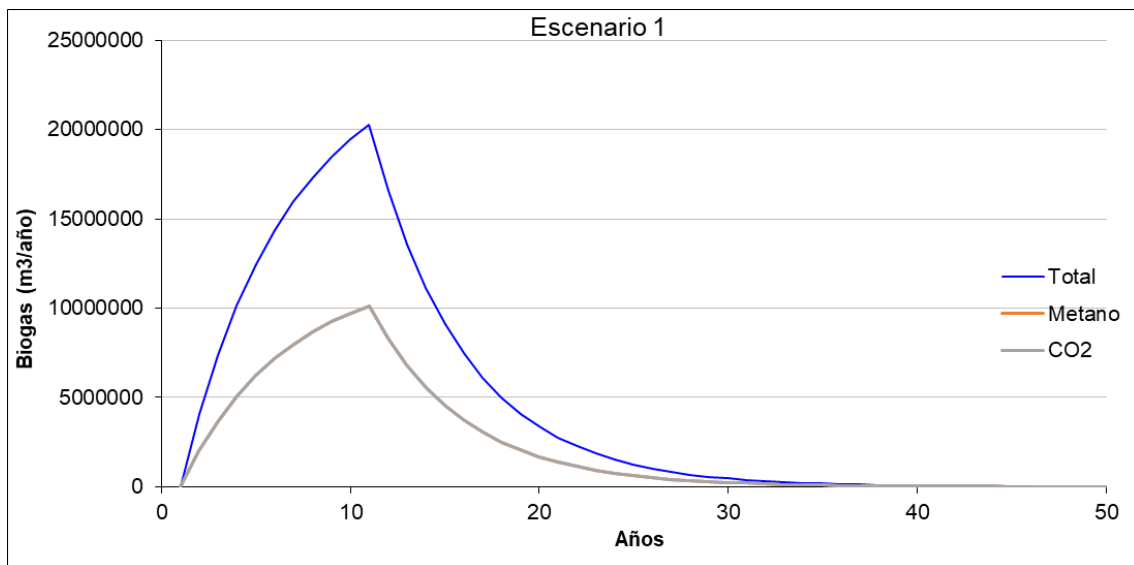
CAA - 50% by volume ▼

Escenario 1		Total	Metano	CO ₂
2020	1	0	0	0
2021	2	4042809,59	2021404,8	2021404,8
2022	3	7386470,47	3693235,23	3693235,23
2023	4	10157716,6	5078858,28	5078858,28
2024	5	12460309,1	6230154,55	6230154,55
2025	6	14379200,7	7189600,37	7189600,37
2026	7	15983944,5	7991972,23	7991972,23
2027	8	17331485,6	8665742,8	8665742,8
2028	9	18468447,3	9234223,66	9234223,66
2029	10	19433001	9716500,48	9716500,48
2030	11	20256398,8	10128199,4	10128199,4
2031	12	16584536,6	8292268,32	8292268,32
2032	13	13578270,2	6789135,09	6789135,09
2033	14	11116947,4	5558473,68	5558473,68
2034	15	9101786,69	4550893,34	4550893,34
2035	16	7451912,67	3725956,33	3725956,33
2036	17	6101110,07	3050555,04	3050555,04
2037	18	4995166,44	2497583,22	2497583,22
2038	19	4089696,38	2044848,19	2044848,19
2039	20	3348360,2	1674180,1	1674180,1
2040	21	2741405,47	1370702,73	1370702,73
2041	22	2244472,96	1122236,48	1122236,48
2042	23	1837619,04	918809,52	918809,52
2043	24	1504515,22	752257,61	752257,61
2044	25	1231792,88	615896,44	615896,44
2045	26	1008506,71	504253,356	504253,356
2046	27	825695,46	412847,73	412847,73
2047	28	676022,265	338011,133	338011,133
2048	29	553480,218	276740,109	276740,109
2049	30	453151,276	226575,638	226575,638

2050	31	371008,886	185504,443	185504,443
2051	32	303756,384	151878,192	151878,192
2052	33	248694,693	124347,347	124347,347
2053	34	203613,993	101806,997	101806,997
2054	35	166705,038	83352,5191	83352,5191
2055	36	136486,541	68243,2707	68243,2707
2056	37	111745,729	55872,8644	55872,8644
2057	38	91489,6648	45744,8324	45744,8324
2058	39	74905,4021	37452,7011	37452,7011
2059	40	61327,3563	30663,6781	30663,6781
2060	41	50210,5926	25105,2963	25105,2963
2061	42	41108,9563	20554,4781	20554,4781
2062	43	33657,1667	16828,5834	16828,5834
2063	44	27556,1575	13778,0787	13778,0787
2064	45	22561,0736	11280,5368	11280,5368
2065	46	18471,4447	9235,72237	9235,72237
2066	47	15123,1399	7561,56993	7561,56993
2067	48	12381,7797	6190,88985	6190,88985
2068	49	10137,3438	5068,67191	5068,67191
2069	50	8299,75513	4149,87757	4149,87757
2070	51	6795,26477	3397,63239	3397,63239
2071	52	5563,49224	2781,74612	2781,74612
2072	53	4555,00219	2277,5011	2277,5011
2073	54	3729,32038	1864,66019	1864,66019
2074	55	3053,30928	1526,65464	1526,65464
2075	56	2499,83821	1249,9191	1249,9191
2076	57	2046,69442	1023,34721	1023,34721
2077	58	1675,69166	837,845831	837,845831
2078	59	1371,9403	685,970148	685,970148
2079	60	1123,24971	561,624856	561,624856
2080	61	919,639083	459,819541	459,819541
2081	62	752,936799	376,468399	376,468399
2082	63	616,452512	308,226256	308,226256
2083	64	504,70863	252,354315	252,354315
2084	65	413,220476	206,610238	206,610238
2085	66	338,316312	169,158156	169,158156
2086	67	276,989969	138,494984	138,494984
2087	68	226,780206	113,390103	113,390103
2088	69	185,671929	92,8359643	92,8359643
2089	70	152,015318	76,007659	76,007659
2090	71	124,459616	62,2298079	62,2298079
2091	72	101,898915	50,9494574	50,9494574
2092	73	83,4277753	41,7138877	41,7138877
2093	74	68,3048853	34,1524427	34,1524427
2094	75	55,9233102	27,9616551	27,9616551

2095	76	45,7861339	22,8930669	22,8930669
2096	77	37,4865159	18,7432579	18,7432579
2097	78	30,6913634	15,3456817	15,3456817
2098	79	25,127963	12,5639815	12,5639815
2099	80	20,5730361	10,2865181	10,2865181
2100	81	16,8437773	8,42188867	8,42188867
2101	82	13,7905185	6,89525925	6,89525925
2102	83	11,2907216	5,6453608	5,6453608
2103	84	9,244061	4,6220305	4,6220305
2104	85	7,56839703	3,78419851	3,78419851
2105	86	6,1964794	3,0982397	3,0982397
2106	87	5,07324824	2,53662412	2,53662412
2107	88	4,15362435	2,07681218	2,07681218
2108	89	3,4007	1,70035	1,70035
2109	90	2,78425767	1,39212883	1,39212883
2110	91	2,27955738	1,13977869	1,13977869
2111	92	1,86634373	0,93317186	0,93317186
2112	93	1,52803301	0,7640165	0,7640165
2113	94	1,25104761	0,62552381	0,62552381
2114	95	1,02427116	0,51213558	0,51213558
2115	96	0,83860229	0,41930115	0,41930115
2116	97	0,68658949	0,34329474	0,34329474
2117	98	0,56213193	0,28106596	0,28106596
2118	99	0,4602347	0,23011735	0,23011735
2119	100	0,3768083	0,18840415	0,18840415
2120	101	0,30850454	0,15425227	0,15425227
2121	102	0,25258216	0,12629108	0,12629108
2122	103	0,20679678	0,10339839	0,10339839
2123	104	0,16931088	0,08465544	0,08465544
2124	105	0,13862003	0,06931001	0,06931001
2125	106	0,11349248	0,05674624	0,05674624
2126	107	0,09291978	0,04645989	0,04645989
2127	108	0,07607628	0,03803814	0,03803814
2128	109	0,06228599	0,031143	0,031143
2129	110	0,05099546	0,02549773	0,02549773
2130	111	0,04175155	0,02087577	0,02087577
2131	112	0,03418328	0,01709164	0,01709164
2132	113	0,0279869	0,01399345	0,01399345
2133	114	0,02291374	0,01145687	0,01145687
2134	115	0,01876018	0,00938009	0,00938009
2135	116	0,01535954	0,00767977	0,00767977
2136	117	0,01257533	0,00628766	0,00628766
2137	118	0,01029581	0,0051479	0,0051479
2138	119	0,00842949	0,00421475	0,00421475
2139	120	0,00690148	0,00345074	0,00345074

2140	121	0,00565046	0,00282523	0,00282523
2141	122	0,0046262	0,0023131	0,0023131
2142	123	0,00378762	0,00189381	0,00189381
2143	124	0,00310104	0,00155052	0,00155052
2144	125	0,00253891	0,00126946	0,00126946
2145	126	0,00207869	0,00103934	0,00103934
2146	127	0,00170189	0,00085094	0,00085094
2147	128	0,00139339	0,00069669	0,00069669
2148	129	0,00114081	0,0005704	0,0005704
2149	130	0,00093401	0,00046701	0,00046701
2150	131	0,00076471	0,00038235	0,00038235
2151	132	0,00062609	0,00031304	0,00031304
2152	133	0,0005126	0,0002563	0,0002563
2153	134	0,00041968	0,00020984	0,00020984
2154	135	0,0003436	0,0001718	0,0001718
2155	136	0,00028132	0,00014066	0,00014066
2156	137	0,00023033	0,00011516	0,00011516
2157	138	0,00018857	9,4287E-05	9,4287E-05
2158	139	0,00015439	7,7196E-05	7,7196E-05
2159	140	0,00012641	6,3203E-05	6,3203E-05
2160	141	0,00010349	5,1746E-05	5,1746E-05



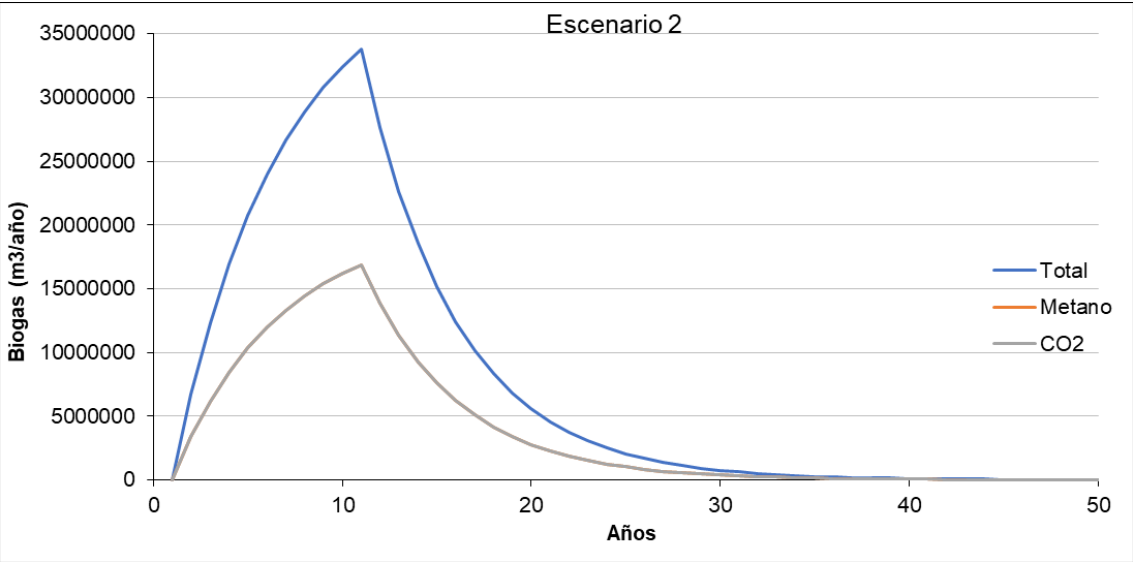
2: DETERMINE MODEL PARAMETERS		Parameters
Methane Generation Rate, k (year⁻¹) User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.		
<input type="text" value="User-specified"/>	User-specified value:	<input type="text" value="0,200"/>
Potential Methane Generation Capacity, L_o (m³/Mg) User-specified L_o value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.		
<input type="text" value="User-specified"/>	User-specified value:	<input type="text" value="100"/>
NMOC Concentration (ppmv as hexane)		
<input type="text" value="CAA - 4,000"/>		
Methane Content (% by volume)		
<input type="text" value="CAA - 50% by volume"/>		

Escenario 2	Total	Metano	CO ₂
1	0	0	0
2	6738015,98	3369007,99	3369007,99
3	12310784,1	6155392,06	6155392,06
4	16929527,6	8464763,81	8464763,81
5	20767181,8	10383590,9	10383590,9
6	23965334,6	11982667,3	11982667,3
7	26639907,4	13319953,7	13319953,7
8	28885809,3	14442904,7	14442904,7
9	30780745,5	15390372,8	15390372,8
10	32388334,9	16194167,5	16194167,5
11	33760664,7	16880332,3	16880332,3
12	27640894,4	13820447,2	13820447,2
13	22630450,3	11315225,1	11315225,1
14	18528245,6	9264122,8	9264122,8
15	15169644,5	7584822,24	7584822,24
16	12419854,4	6209927,22	6209927,22
17	10168516,8	5084258,39	5084258,39
18	8325277,41	4162638,7	4162638,7
19	6816160,64	3408080,32	3408080,32
20	5580600,33	2790300,17	2790300,17
21	4569009,11	2284504,56	2284504,56
22	3740788,27	1870394,14	1870394,14
23	3062698,4	1531349,2	1531349,2
24	2507525,37	1253762,68	1253762,68
25	2052988,13	1026494,07	1026494,07
26	1680844,52	840422,26	840422,26
27	1376159,1	688079,55	688079,55
28	1126703,78	563351,888	563351,888
29	922467,031	461233,515	461233,515
30	755252,127	377626,063	377626,063

31	618348,143	309174,071	309174,071
32	506260,64	253130,32	253130,32
33	414491,155	207245,578	207245,578
34	339356,656	169678,328	169678,328
35	277841,73	138920,865	138920,865
36	227477,569	113738,785	113738,785
37	186242,881	93121,4407	93121,4407
38	152482,775	76241,3873	76241,3873
39	124842,337	62421,1684	62421,1684
40	102212,26	51106,1302	51106,1302
41	83684,321	41842,1605	41842,1605
42	68514,9272	34257,4636	34257,4636
43	56095,2779	28047,639	28047,639
44	45926,9291	22963,4646	22963,4646
45	37601,7893	18800,8946	18800,8946
46	30785,7412	15392,8706	15392,8706
47	25205,2331	12602,6166	12602,6166
48	20636,2995	10318,1497	10318,1497
49	16895,573	8447,78651	8447,78651
50	13832,9252	6916,46261	6916,46261
51	11325,4413	5662,72064	5662,72064
52	9272,48707	4636,24354	4636,24354
53	7591,67032	3795,83516	3795,83516
54	6215,53396	3107,76698	3107,76698
55	5088,8488	2544,4244	2544,4244
56	4166,39701	2083,19851	2083,19851
57	3411,15736	1705,57868	1705,57868
58	2792,81944	1396,40972	1396,40972
59	2286,56716	1143,28358	1143,28358
60	1872,08285	936,041427	936,041427
61	1532,7318	766,365902	766,365902
62	1254,89466	627,447332	627,447332
63	1027,42085	513,710427	513,710427
64	841,181049	420,590525	420,590525
65	688,700794	344,350397	344,350397
66	563,86052	281,93026	281,93026
67	461,649948	230,824974	230,824974
68	377,967009	188,983505	188,983505
69	309,453214	154,726607	154,726607
70	253,358863	126,679432	126,679432
71	207,432693	103,716346	103,716346
72	169,831525	84,9157624	84,9157624
73	139,046292	69,5231461	69,5231461
74	113,841476	56,9207378	56,9207378
75	93,205517	46,6027585	46,6027585

76	76,3102231	38,1551116	38,1551116
77	62,4775264	31,2387632	31,2387632
78	51,1522723	25,5761361	25,5761361
79	41,8799384	20,9399692	20,9399692
80	34,2883935	17,1441968	17,1441968
81	28,0729622	14,0364811	14,0364811
82	22,9841975	11,4920988	11,4920988
83	18,8178693	9,40893467	9,40893467
84	15,4067683	7,70338417	7,70338417
85	12,613995	6,30699752	6,30699752
86	10,3274657	5,16373283	5,16373283
87	8,45541374	4,22770687	4,22770687
88	6,92270726	3,46135363	3,46135363
89	5,66783333	2,83391666	2,83391666
90	4,64042945	2,32021472	2,32021472
91	3,7992623	1,89963115	1,89963115
92	3,11057288	1,55528644	1,55528644
93	2,54672168	1,27336084	1,27336084
94	2,08507936	1,04253968	1,04253968
95	1,70711859	0,8535593	0,8535593
96	1,39767049	0,69883525	0,69883525
97	1,14431581	0,57215791	0,57215791
98	0,93688655	0,46844327	0,46844327
99	0,76705783	0,38352891	0,38352891
100	0,62801383	0,31400692	0,31400692
101	0,51417424	0,25708712	0,25708712
102	0,42097026	0,21048513	0,21048513
103	0,3446613	0,17233065	0,17233065
104	0,28218481	0,1410924	0,1410924
105	0,23103338	0,11551669	0,11551669
106	0,18915413	0,09457707	0,09457707
107	0,1548663	0,07743315	0,07743315
108	0,12679381	0,0633969	0,0633969
109	0,10380999	0,05190499	0,05190499
110	0,08499243	0,04249622	0,04249622
111	0,06958592	0,03479296	0,03479296
112	0,05697213	0,02848606	0,02848606
113	0,04664483	0,02332242	0,02332242
114	0,03818956	0,01909478	0,01909478
115	0,03126697	0,01563348	0,01563348
116	0,02559923	0,01279961	0,01279961
117	0,02095888	0,01047944	0,01047944
118	0,01715968	0,00857984	0,00857984
119	0,01404915	0,00702458	0,00702458
120	0,01150247	0,00575124	0,00575124

121	0,00941743	0,00470871	0,00470871
122	0,00771034	0,00385517	0,00385517
123	0,00631269	0,00315635	0,00315635
124	0,00516839	0,0025842	0,0025842
125	0,00423152	0,00211576	0,00211576
126	0,00346448	0,00173224	0,00173224
127	0,00283648	0,00141824	0,00141824
128	0,00232231	0,00116115	0,00116115
129	0,00190135	0,00095067	0,00095067
130	0,00155669	0,00077835	0,00077835
131	0,00127451	0,00063726	0,00063726
132	0,00104348	0,00052174	0,00052174
133	0,00085433	0,00042716	0,00042716
134	0,00069947	0,00034973	0,00034973
135	0,00057267	0,00028634	0,00028634
136	0,00046887	0,00023443	0,00023443
137	0,00038388	0,00019194	0,00019194
138	0,00031429	0,00015715	0,00015715
139	0,00025732	0,00012866	0,00012866
140	0,00021068	0,00010534	0,00010534
141	0,00017249	8,6243E-05	8,6243E-05



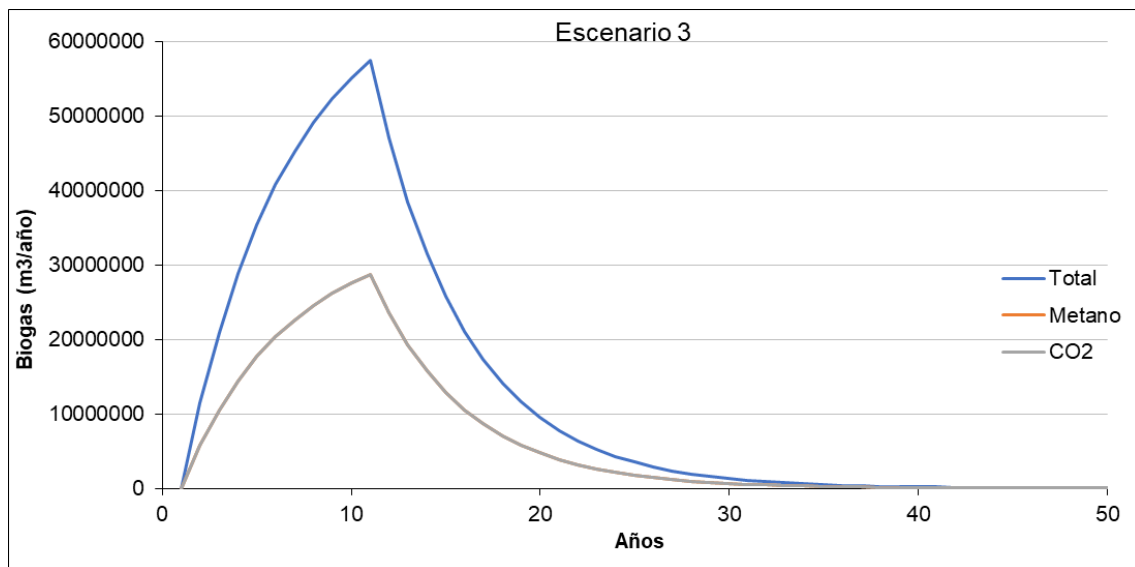
2: DETERMINE MODEL PARAMETERS		Parameters
Methane Generation Rate, k (year^{-1}) User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.		
<div>User-specified</div>	<div>User-specified value:</div>	<div>0,200</div>
Potential Methane Generation Capacity, L_o (m^3/Mg) User-specified L_o value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.		
<div>User-specified</div>	<div>User-specified value:</div>	<div>170</div>
NMOC Concentration (ppmv as hexane)		
<div>CAA - 4,000</div>		
Methane Content (% by volume)		
<div>CAA - 50% by volume</div>		

Escenario 3	Total	Metano	CO ₂
1	0	0	0
2	11454627,17	5727313,59	5727313,59
3	20928332,99	10464166,5	10464166,5
4	28780196,95	14390098,5	14390098,5
5	35304209,1	17652104,5	17652104,5
6	40741068,76	20370534,4	20370534,4
7	45287842,63	22643921,3	22643921,3
8	49105875,88	24552937,9	24552937,9
9	52327267,4	26163633,7	26163633,7
10	55060169,37	27530084,7	27530084,7
11	57393129,92	28696565	28696565
12	46989520,48	23494760,2	23494760,2
13	38471765,49	19235882,7	19235882,7
14	31498017,53	15749008,8	15749008,8
15	25788395,61	12894197,8	12894197,8
16	21113752,56	10556876,3	10556876,3
17	17286478,54	8643239,27	8643239,27
18	14152971,59	7076485,79	7076485,79
19	11587473,09	5793736,54	5793736,54
20	9487020,567	4743510,28	4743510,28
21	7767315,493	3883657,75	3883657,75
22	6359340,063	3179670,03	3179670,03
23	5206587,279	2603293,64	2603293,64
24	4262793,124	2131396,56	2131396,56
25	3490079,825	1745039,91	1745039,91
26	2857435,683	1428717,84	1428717,84
27	2339470,469	1169735,23	1169735,23
28	1915396,419	957698,209	957698,209
29	1568193,952	784096,976	784096,976
30	1283928,616	641964,308	641964,308

31	1051191,842	525595,921	525595,921
32	860643,0887	430321,544	430321,544
33	704634,9641	352317,482	352317,482
34	576906,3148	288453,157	288453,157
35	472330,9416	236165,471	236165,471
36	386711,8675	193355,934	193355,934
37	316612,8985	158306,449	158306,449
38	259220,7168	129610,358	129610,358
39	212231,9727	106115,986	106115,986
40	173760,8428	86880,4214	86880,4214
41	142263,3457	71131,6729	71131,6729
42	116475,3762	58237,6881	58237,6881
43	95361,97245	47680,9862	47680,9862
44	78075,77952	39037,8898	39037,8898
45	63923,04176	31961,5209	31961,5209
46	52335,76012	26167,8801	26167,8801
47	42848,8963	21424,4481	21424,4481
48	35081,70913	17540,8546	17540,8546
49	28722,47414	14361,2371	14361,2371
50	23515,97288	11757,9864	11757,9864
51	19253,25019	9626,62509	9626,62509
52	15763,22802	7881,61401	7881,61401
53	12905,83955	6452,91978	6452,91978
54	10566,40773	5283,20387	5283,20387
55	8651,042962	4325,52148	4325,52148
56	7082,874919	3541,43746	3541,43746
57	5798,967517	2899,48376	2899,48376
58	4747,793042	2373,89652	2373,89652
59	3887,164173	1943,58209	1943,58209
60	3182,54085	1591,27043	1591,27043
61	2605,644067	1302,82203	1302,82203
62	2133,320929	1066,66046	1066,66046
63	1746,615451	873,307726	873,307726
64	1430,007784	715,003892	715,003892
65	1170,79135	585,395675	585,395675
66	958,5628833	479,281442	479,281442
67	784,8049113	392,402456	392,402456
68	642,5439161	321,271958	321,271958
69	526,0704643	263,035232	263,035232
70	430,7100674	215,355034	215,355034
71	352,6355778	176,317789	176,317789
72	288,7135922	144,356796	144,356796
73	236,3786968	118,189348	118,189348
74	193,5305084	96,7652542	96,7652542
75	158,4493789	79,2246895	79,2246895

76	129,7273793	64,8636897	64,8636897
77	106,211795	53,1058975	53,1058975
78	86,95886287	43,4794314	43,4794314
79	71,19589529	35,5979476	35,5979476
80	58,29026897	29,1451345	29,1451345
81	47,72403581	23,8620179	23,8620179
82	39,07313578	19,5365679	19,5365679
83	31,99037788	15,9951889	15,9951889
84	26,19150617	13,0957531	13,0957531
85	21,44379157	10,7218958	10,7218958
86	17,55669162	8,77834581	8,77834581
87	14,37420335	7,18710168	7,18710168
88	11,76860234	5,88430117	5,88430117
89	9,635316654	4,81765833	4,81765833
90	7,88873006	3,94436503	3,94436503
91	6,458745903	3,22937295	3,22937295
92	5,287973897	2,64398695	2,64398695
93	4,329426851	2,16471343	2,16471343
94	3,544634906	1,77231745	1,77231745
95	2,902101606	1,4510508	1,4510508
96	2,376039834	1,18801992	1,18801992
97	1,945336882	0,97266844	0,97266844
98	1,592707131	0,79635357	0,79635357
99	1,303998308	0,65199915	0,65199915
100	1,067623517	0,53381176	0,53381176
101	0,874096206	0,4370481	0,4370481
102	0,715649445	0,35782472	0,35782472
103	0,585924209	0,2929621	0,2929621
104	0,479714169	0,23985708	0,23985708
105	0,392756743	0,19637837	0,19637837
106	0,321562024	0,16078101	0,16078101
107	0,263272718	0,13163636	0,13163636
108	0,215549471	0,10777474	0,10777474
109	0,17647698	0,08823849	0,08823849
110	0,144487131	0,07224357	0,07224357
111	0,118296058	0,05914803	0,05914803
112	0,09685262	0,04842631	0,04842631
113	0,079296219	0,03964811	0,03964811
114	0,064922253	0,03246113	0,03246113
115	0,053153845	0,02657692	0,02657692
116	0,043518688	0,02175934	0,02175934
117	0,035630088	0,01781504	0,01781504
118	0,029171449	0,01458572	0,01458572
119	0,023883562	0,01194178	0,01194178
120	0,019554207	0,0097771	0,0097771

121	0,01600963	0,00800482	0,00800482
122	0,013107577	0,00655379	0,00655379
123	0,010731576	0,00536579	0,00536579
124	0,008786271	0,00439314	0,00439314
125	0,007193591	0,0035968	0,0035968
126	0,005889614	0,00294481	0,00294481
127	0,004822008	0,002411	0,002411
128	0,003947926	0,00197396	0,00197396
129	0,003232289	0,00161614	0,00161614
130	0,002646374	0,00132319	0,00132319
131	0,002166668	0,00108333	0,00108333
132	0,001773918	0,00088696	0,00088696
133	0,001452361	0,00072618	0,00072618
134	0,001189093	0,00059455	0,00059455
135	0,000973547	0,00048677	0,00048677
136	0,000797073	0,00039854	0,00039854
137	0,000652588	0,00032629	0,00032629
138	0,000534294	0,00026715	0,00026715
139	0,000437443	0,00021872	0,00021872
140	0,000358148	0,00017907	0,00017907
141	0,000293227	0,00014661	0,00014661



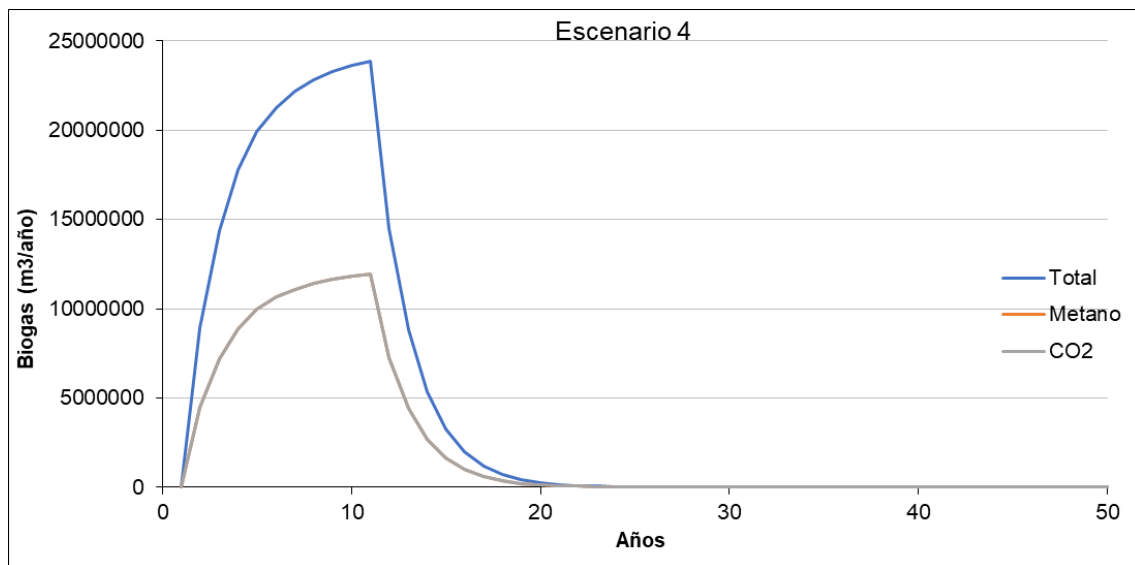
2: DETERMINE MODEL PARAMETERS		Parameters
Methane Generation Rate, k (year⁻¹) User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.		
<input type="text" value="User-specified"/>	User-specified value:	<input type="text" value="0,500"/>
Potential Methane Generation Capacity, L_o (m³/Mg) User-specified L_o value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.		
<input type="text" value="User-specified"/>	User-specified value:	<input type="text" value="60"/>
NMOC Concentration (ppmv as hexane)		
<input type="text" value="CAA - 4,000"/>		
Methane Content (% by volume)		
<input type="text" value="CAA - 50% by volume"/>		

Escenario 4	Total	Metano	CO ₂
1	0	0	0
2	8907308,03	4453654,02	4453654,02
3	14384087,2	7192043,59	7192043,59
4	17780144,9	8890072,44	8890072,44
5	19914181,2	9957090,62	9957090,62
6	21282763,4	10641381,7	10641381,7
7	22187073,7	11093536,9	11093536,9
8	22809788,9	11404894,5	11404894,5
9	23261708,5	11630854,2	11630854,2
10	23610034,8	11805017,4	11805017,4
11	23895528,6	11947764,3	11947764,3
12	14493370,7	7246685,36	7246685,36
13	8790673,71	4395336,85	4395336,85
14	5331813,12	2665906,56	2665906,56
15	3233908,13	1616954,07	1616954,07
16	1961464,43	980732,216	980732,216
17	1189688,32	594844,158	594844,158
18	721582,439	360791,22	360791,22
19	437661,873	218830,936	218830,936
20	265455,345	132727,672	132727,672
21	161006,805	80503,4026	80503,4026
22	97655,5638	48827,7819	48827,7819
23	59231,0935	29615,5468	29615,5468
24	35925,4742	17962,7371	17962,7371
25	21789,9016	10894,9508	10894,9508
26	13216,2434	6608,12169	6608,12169
27	8016,05682	4008,02841	4008,02841
28	4861,98423	2430,99212	2430,99212
29	2948,9425	1474,47125	1474,47125
30	1788,62404	894,312021	894,312021

31	1084,85532	542,42766	542,42766
32	657,998013	328,999007	328,999007
33	399,095969	199,547984	199,547984
34	242,063941	121,031971	121,031971
35	146,819202	73,409601	73,409601
36	89,0503475	44,5251737	44,5251737
37	54,011766	27,005883	27,005883
38	32,7597921	16,379896	16,379896
39	19,8698183	9,93490915	9,93490915
40	12,051654	6,025827	6,025827
41	7,30969765	3,65484882	3,65484882
42	4,43355574	2,21677787	2,21677787
43	2,68908749	1,34454374	1,34454374
44	1,63101401	0,815507	0,815507
45	0,98926	0,49463	0,49463
46	0,60001652	0,30000826	0,30000826
47	0,36392842	0,18196421	0,18196421
48	0,22073374	0,11036687	0,11036687
49	0,13388178	0,06694089	0,06694089
50	0,08120341	0,0406017	0,0406017
51	0,04925236	0,02462618	0,02462618
52	0,02987306	0,01493653	0,01493653
53	0,01811893	0,00905946	0,00905946
54	0,01098969	0,00549484	0,00549484
55	0,00666558	0,00333279	0,00333279
56	0,00404288	0,00202144	0,00202144
57	0,00245213	0,00122607	0,00122607
58	0,00148729	0,00074365	0,00074365
59	0,00090209	0,00045104	0,00045104
60	0,00054714	0,00027357	0,00027357
61	0,00033186	0,00016593	0,00016593
62	0,00020128	0,00010064	0,00010064
63	0,00012208	6,1042E-05	6,1042E-05
64	7,4048E-05	3,7024E-05	3,7024E-05
65	4,4912E-05	2,2456E-05	2,2456E-05
66	2,7241E-05	1,362E-05	1,362E-05
67	1,6522E-05	8,2612E-06	8,2612E-06
68	1,0021E-05	5,0106E-06	5,0106E-06
69	6,0782E-06	3,0391E-06	3,0391E-06
70	3,6866E-06	1,8433E-06	1,8433E-06
71	2,2361E-06	1,118E-06	1,118E-06
72	1,3562E-06	6,7812E-07	6,7812E-07
73	8,226E-07	4,113E-07	4,113E-07
74	4,9893E-07	2,4947E-07	2,4947E-07
75	3,0262E-07	1,5131E-07	1,5131E-07

76	1,8355E-07	9,1773E-08	9,1773E-08
77	1,1133E-07	5,5663E-08	5,5663E-08
78	6,7523E-08	3,3761E-08	3,3761E-08
79	4,0955E-08	2,0477E-08	2,0477E-08
80	2,484E-08	1,242E-08	1,242E-08
81	1,5066E-08	7,5332E-09	7,5332E-09
82	9,1382E-09	4,5691E-09	4,5691E-09
83	5,5426E-09	2,7713E-09	2,7713E-09
84	3,3618E-09	1,6809E-09	1,6809E-09
85	2,039E-09	1,0195E-09	1,0195E-09
86	1,2367E-09	6,1836E-10	6,1836E-10
87	7,5011E-10	3,7506E-10	3,7506E-10
88	4,5497E-10	2,2748E-10	2,2748E-10
89	2,7595E-10	1,3798E-10	1,3798E-10
90	1,6737E-10	8,3686E-11	8,3686E-11
91	1,0152E-10	5,0758E-11	5,0758E-11
92	6,1573E-11	3,0786E-11	3,0786E-11
93	3,7346E-11	1,8673E-11	1,8673E-11
94	2,2651E-11	1,1326E-11	1,1326E-11
95	1,3739E-11	6,8694E-12	6,8694E-12
96	8,333E-12	4,1665E-12	4,1665E-12
97	5,0542E-12	2,5271E-12	2,5271E-12
98	3,0655E-12	1,5328E-12	1,5328E-12
99	1,8593E-12	9,2967E-13	9,2967E-13
100	1,1277E-12	5,6387E-13	5,6387E-13
101	6,8401E-13	3,4201E-13	3,4201E-13
102	4,1488E-13	2,0744E-13	2,0744E-13
103	2,5163E-13	1,2582E-13	1,2582E-13
104	1,5262E-13	7,6312E-14	7,6312E-14
105	9,2571E-14	4,6286E-14	4,6286E-14
106	5,6147E-14	2,8074E-14	2,8074E-14
107	3,4055E-14	1,7028E-14	1,7028E-14
108	2,0655E-14	1,0328E-14	1,0328E-14
109	1,2528E-14	6,2641E-15	6,2641E-15
110	7,5987E-15	3,7994E-15	3,7994E-15
111	4,6088E-15	2,3044E-15	2,3044E-15
112	2,7954E-15	1,3977E-15	1,3977E-15
113	1,6955E-15	8,4775E-16	8,4775E-16
114	1,0284E-15	5,1419E-16	5,1419E-16
115	6,2374E-16	3,1187E-16	3,1187E-16
116	3,7832E-16	1,8916E-16	1,8916E-16
117	2,2946E-16	1,1473E-16	1,1473E-16
118	1,3918E-16	6,9588E-17	6,9588E-17
119	8,4414E-17	4,2207E-17	4,2207E-17
120	5,12E-17	2,56E-17	2,56E-17

121	3,1054E-17	1,5527E-17	1,5527E-17
122	1,8835E-17	9,4177E-18	9,4177E-18
123	1,1424E-17	5,7121E-18	5,7121E-18
124	6,9291E-18	3,4646E-18	3,4646E-18
125	4,2027E-18	2,1014E-18	2,1014E-18
126	2,5491E-18	1,2745E-18	1,2745E-18
127	1,5461E-18	7,7305E-19	7,7305E-19
128	9,3776E-19	4,6888E-19	4,6888E-19
129	5,6878E-19	2,8439E-19	2,8439E-19
130	3,4498E-19	1,7249E-19	1,7249E-19
131	2,0924E-19	1,0462E-19	1,0462E-19
132	1,2691E-19	6,3456E-20	6,3456E-20
133	7,6976E-20	3,8488E-20	3,8488E-20
134	4,6688E-20	2,3344E-20	2,3344E-20
135	2,8318E-20	1,4159E-20	1,4159E-20
136	1,7176E-20	8,5878E-21	8,5878E-21
137	1,0418E-20	5,2088E-21	5,2088E-21
138	6,3185E-21	3,1593E-21	3,1593E-21
139	3,8324E-21	1,9162E-21	1,9162E-21
140	2,3245E-21	1,1622E-21	1,1622E-21
141	1,4099E-21	7,0493E-22	7,0493E-22



2: DETERMINE MODEL PARAMETERS
Parameters

Methane Generation Rate, k (year^{-1})
User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.

User-specified
User-specified value: 0,500

Potential Methane Generation Capacity, L_o (m^3/Mg)
User-specified L_o value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.

User-specified
User-specified value: 100

NMOC Concentration (ppmv as hexane)

CAA - 4,000

Methane Content (% by volume)

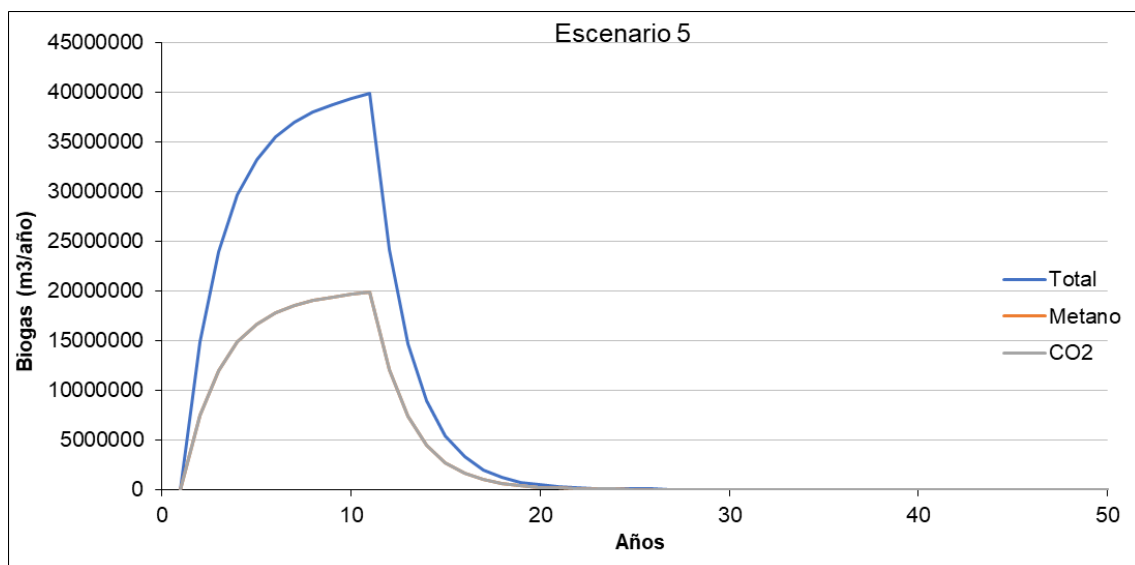
CAA - 50% by volume

Escenario 5	Total	Metano	CO ₂
1	0	0	0
2	14845513,4	7422756,69	7422756,69
3	23973478,6	11986739,3	11986739,3
4	29633574,8	14816787,4	14816787,4
5	33190302,1	16595151	16595151
6	35471272,4	17735636,2	17735636,2
7	36978456,2	18489228,1	18489228,1
8	38016314,8	19008157,4	19008157,4
9	38769514,1	19384757,1	19384757,1
10	39350058	19675029	19675029
11	39825881	19912940,5	19912940,5
12	24155617,9	12077808,9	12077808,9
13	14651122,8	7325561,42	7325561,42
14	8886355,21	4443177,6	4443177,6
15	5389846,89	2694923,44	2694923,44
16	3269107,39	1634553,69	1634553,69
17	1982813,86	991406,93	991406,93
18	1202637,4	601318,699	601318,699
19	729436,455	364718,227	364718,227
20	442425,574	221212,787	221212,787
21	268344,675	134172,338	134172,338
22	162759,273	81379,6365	81379,6365
23	98718,4892	49359,2446	49359,2446
24	59875,7904	29937,8952	29937,8952
25	36316,5026	18158,2513	18158,2513
26	22027,0723	11013,5362	11013,5362
27	13360,0947	6680,04735	6680,04735
28	8103,30705	4051,65353	4051,65353
29	4914,90417	2457,45209	2457,45209
30	2981,04007	1490,52003	1490,52003

31	1808,0922	904,0461	904,0461
32	1096,66336	548,331678	548,331678
33	665,159948	332,579974	332,579974
34	403,439902	201,719951	201,719951
35	244,69867	122,349335	122,349335
36	148,417246	74,2086229	74,2086229
37	90,01961	45,009805	45,009805
38	54,5996534	27,2998267	27,2998267
39	33,1163638	16,5581819	16,5581819
40	20,08609	10,043045	10,043045
41	12,1828294	6,09141471	6,09141471
42	7,38925956	3,69462978	3,69462978
43	4,48181248	2,24090624	2,24090624
44	2,71835668	1,35917834	1,35917834
45	1,64876667	0,82438333	0,82438333
46	1,00002754	0,50001377	0,50001377
47	0,60654736	0,30327368	0,30327368
48	0,36788957	0,18394479	0,18394479
49	0,2231363	0,11156815	0,11156815
50	0,13533901	0,0676695	0,0676695
51	0,08208726	0,04104363	0,04104363
52	0,04978844	0,02489422	0,02489422
53	0,03019821	0,01509911	0,01509911
54	0,01831614	0,00915807	0,00915807
55	0,0111093	0,00555465	0,00555465
56	0,00673813	0,00336907	0,00336907
57	0,00408688	0,00204344	0,00204344
58	0,00247882	0,00123941	0,00123941
59	0,00150348	0,00075174	0,00075174
60	0,00091191	0,00045595	0,00045595
61	0,0005531	0,00027655	0,00027655
62	0,00033547	0,00016774	0,00016774
63	0,00020347	0,00010174	0,00010174
64	0,00012341	6,1707E-05	6,1707E-05
65	7,4854E-05	3,7427E-05	3,7427E-05
66	4,5401E-05	2,2701E-05	2,2701E-05
67	2,7537E-05	1,3769E-05	1,3769E-05
68	1,6702E-05	8,3511E-06	8,3511E-06
69	1,013E-05	5,0652E-06	5,0652E-06
70	6,1444E-06	3,0722E-06	3,0722E-06
71	3,7268E-06	1,8634E-06	1,8634E-06
72	2,2604E-06	1,1302E-06	1,1302E-06
73	1,371E-06	6,855E-07	6,855E-07
74	8,3155E-07	4,1578E-07	4,1578E-07
75	5,0436E-07	2,5218E-07	2,5218E-07

76	3,0591E-07	1,5296E-07	1,5296E-07
77	1,8554E-07	9,2772E-08	9,2772E-08
78	1,1254E-07	5,6269E-08	5,6269E-08
79	6,8258E-08	3,4129E-08	3,4129E-08
80	4,1401E-08	2,07E-08	2,07E-08
81	2,5111E-08	1,2555E-08	1,2555E-08
82	1,523E-08	7,6152E-09	7,6152E-09
83	9,2377E-09	4,6189E-09	4,6189E-09
84	5,603E-09	2,8015E-09	2,8015E-09
85	3,3984E-09	1,6992E-09	1,6992E-09
86	2,0612E-09	1,0306E-09	1,0306E-09
87	1,2502E-09	6,2509E-10	6,2509E-10
88	7,5828E-10	3,7914E-10	3,7914E-10
89	4,5992E-10	2,2996E-10	2,2996E-10
90	2,7895E-10	1,3948E-10	1,3948E-10
91	1,6919E-10	8,4597E-11	8,4597E-11
92	1,0262E-10	5,1311E-11	5,1311E-11
93	6,2243E-11	3,1122E-11	3,1122E-11
94	3,7752E-11	1,8876E-11	1,8876E-11
95	2,2898E-11	1,1449E-11	1,1449E-11
96	1,3888E-11	6,9442E-12	6,9442E-12
97	8,4237E-12	4,2118E-12	4,2118E-12
98	5,1092E-12	2,5546E-12	2,5546E-12
99	3,0989E-12	1,5495E-12	1,5495E-12
100	1,8796E-12	9,3979E-13	9,3979E-13
101	1,14E-12	5,7001E-13	5,7001E-13
102	6,9146E-13	3,4573E-13	3,4573E-13
103	4,1939E-13	2,097E-13	2,097E-13
104	2,5437E-13	1,2719E-13	1,2719E-13
105	1,5429E-13	7,7143E-14	7,7143E-14
106	9,3579E-14	4,6789E-14	4,6789E-14
107	5,6758E-14	2,8379E-14	2,8379E-14
108	3,4426E-14	1,7213E-14	1,7213E-14
109	2,088E-14	1,044E-14	1,044E-14
110	1,2665E-14	6,3323E-15	6,3323E-15
111	7,6814E-15	3,8407E-15	3,8407E-15
112	4,659E-15	2,3295E-15	2,3295E-15
113	2,8258E-15	1,4129E-15	1,4129E-15
114	1,714E-15	8,5698E-16	8,5698E-16
115	1,0396E-15	5,1978E-16	5,1978E-16
116	6,3053E-16	3,1526E-16	3,1526E-16
117	3,8244E-16	1,9122E-16	1,9122E-16
118	2,3196E-16	1,1598E-16	1,1598E-16
119	1,4069E-16	7,0345E-17	7,0345E-17
120	8,5333E-17	4,2666E-17	4,2666E-17

121	5,1757E-17	2,5878E-17	2,5878E-17
122	3,1392E-17	1,5696E-17	1,5696E-17
123	1,904E-17	9,5202E-18	9,5202E-18
124	1,1549E-17	5,7743E-18	5,7743E-18
125	7,0045E-18	3,5023E-18	3,5023E-18
126	4,2485E-18	2,1242E-18	2,1242E-18
127	2,5768E-18	1,2884E-18	1,2884E-18
128	1,5629E-18	7,8146E-19	7,8146E-19
129	9,4796E-19	4,7398E-19	4,7398E-19
130	5,7497E-19	2,8748E-19	2,8748E-19
131	3,4874E-19	1,7437E-19	1,7437E-19
132	2,1152E-19	1,0576E-19	1,0576E-19
133	1,2829E-19	6,4146E-20	6,4146E-20
134	7,7813E-20	3,8907E-20	3,8907E-20
135	4,7196E-20	2,3598E-20	2,3598E-20
136	2,8626E-20	1,4313E-20	1,4313E-20
137	1,7363E-20	8,6813E-21	8,6813E-21
138	1,0531E-20	5,2655E-21	5,2655E-21
139	6,3873E-21	3,1937E-21	3,1937E-21
140	3,8741E-21	1,9371E-21	1,9371E-21
141	2,3498E-21	1,1749E-21	1,1749E-21



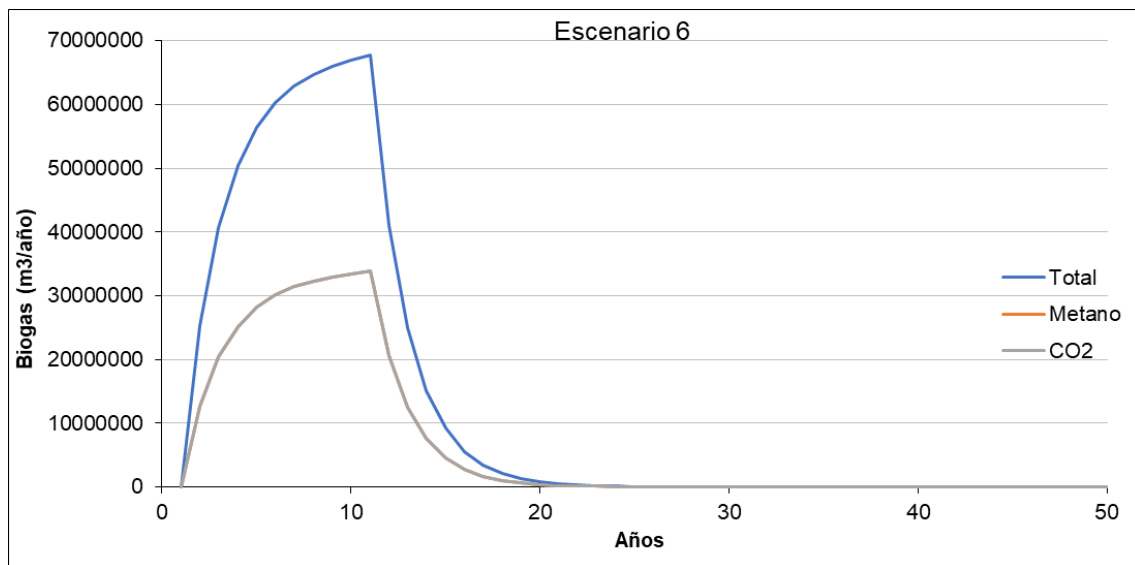
2: DETERMINE MODEL PARAMETERS		Parameters
Methane Generation Rate, k (year^{-1}) User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.		
<div> <div>User-specified</div> <div></div> </div>	<div> <div>User-specified value:</div> <div>0,500</div> </div>	
Potential Methane Generation Capacity, L_o (m^3/Mg) User-specified L_o value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.		
<div> <div>User-specified</div> <div></div> </div>	<div> <div>User-specified value:</div> <div>170</div> </div>	
NMOC Concentration (ppmv as hexane)		
<div> <div>CAA - 4,000</div> <div></div> </div>		
Methane Content (% by volume)		
<div> <div>CAA - 50% by volume</div> <div></div> </div>		

Escenario 6	Total	Metano	CO ₂
1	0	0	0
2	25237372,8	12618686,4	12618686,4
3	40754913,7	20377456,8	20377456,8
4	50377077,1	25188538,6	25188538,6
5	56423513,5	28211756,7	28211756,7
6	60301163,1	30150581,5	30150581,5
7	62863375,6	31431687,8	31431687,8
8	64627735,2	32313867,6	32313867,6
9	65908174	32954087	32954087
10	66895098,5	33447549,3	33447549,3
11	67703997,7	33851998,9	33851998,9
12	41064550,4	20532275,2	20532275,2
13	24906908,8	12453454,4	12453454,4
14	15106803,9	7553401,93	7553401,93
15	9162739,71	4581369,85	4581369,85
16	5557482,56	2778741,28	2778741,28
17	3370783,56	1685391,78	1685391,78
18	2044483,58	1022241,79	1022241,79
19	1240041,97	620020,987	620020,987
20	752123,476	376061,738	376061,738
21	456185,948	228092,974	228092,974
22	276690,764	138345,382	138345,382
23	167821,432	83910,7158	83910,7158
24	101788,844	50894,4218	50894,4218
25	61738,0545	30869,0273	30869,0273
26	37446,0229	18723,0115	18723,0115
27	22712,161	11356,0805	11356,0805
28	13775,622	6887,81099	6887,81099
29	8355,33709	4177,66855	4177,66855
30	5067,76812	2533,88406	2533,88406

31	3073,75674	1536,87837	1536,87837
32	1864,3277	932,163852	932,163852
33	1130,77191	565,385956	565,385956
34	685,847834	342,923917	342,923917
35	415,987739	207,99387	207,99387
36	252,309318	126,154659	126,154659
37	153,033337	76,5166685	76,5166685
38	92,8194108	46,4097054	46,4097054
39	56,2978185	28,1489092	28,1489092
40	34,146353	17,0731765	17,0731765
41	20,71081	10,355405	10,355405
42	12,5617413	6,28087063	6,28087063
43	7,61908121	3,80954061	3,80954061
44	4,62120635	2,31060318	2,31060318
45	2,80290334	1,40145167	1,40145167
46	1,70004681	0,85002341	0,85002341
47	1,03113051	0,51556526	0,51556526
48	0,62541227	0,31270614	0,31270614
49	0,37933172	0,18966586	0,18966586
50	0,23007632	0,11503816	0,11503816
51	0,13954834	0,06977417	0,06977417
52	0,08464035	0,04232017	0,04232017
53	0,05133697	0,02566848	0,02566848
54	0,03113744	0,01556872	0,01556872
55	0,01888581	0,00944291	0,00944291
56	0,01145483	0,00572741	0,00572741
57	0,0069477	0,00347385	0,00347385
58	0,00421399	0,002107	0,002107
59	0,00255592	0,00127796	0,00127796
60	0,00155024	0,00077512	0,00077512
61	0,00094027	0,00047013	0,00047013
62	0,0005703	0,00028515	0,00028515
63	0,00034591	0,00017295	0,00017295
64	0,0002098	0,0001049	0,0001049
65	0,00012725	6,3626E-05	6,3626E-05
66	7,7182E-05	3,8591E-05	3,8591E-05
67	4,6813E-05	2,3407E-05	2,3407E-05
68	2,8394E-05	1,4197E-05	1,4197E-05
69	1,7222E-05	8,6108E-06	8,6108E-06
70	1,0445E-05	5,2227E-06	5,2227E-06
71	6,3355E-06	3,1677E-06	3,1677E-06
72	3,8427E-06	1,9213E-06	1,9213E-06
73	2,3307E-06	1,1653E-06	1,1653E-06
74	1,4136E-06	7,0682E-07	7,0682E-07
75	8,5741E-07	4,2871E-07	4,2871E-07

76	5,2005E-07	2,6002E-07	2,6002E-07
77	3,1543E-07	1,5771E-07	1,5771E-07
78	1,9132E-07	9,5658E-08	9,5658E-08
79	1,1604E-07	5,8019E-08	5,8019E-08
80	7,0381E-08	3,519E-08	3,519E-08
81	4,2688E-08	2,1344E-08	2,1344E-08
82	2,5892E-08	1,2946E-08	1,2946E-08
83	1,5704E-08	7,852E-09	7,852E-09
84	9,525E-09	4,7625E-09	4,7625E-09
85	5,7772E-09	2,8886E-09	2,8886E-09
86	3,5041E-09	1,752E-09	1,752E-09
87	2,1253E-09	1,0627E-09	1,0627E-09
88	1,2891E-09	6,4454E-10	6,4454E-10
89	7,8186E-10	3,9093E-10	3,9093E-10
90	4,7422E-10	2,3711E-10	2,3711E-10
91	2,8763E-10	1,4382E-10	1,4382E-10
92	1,7446E-10	8,7228E-11	8,7228E-11
93	1,0581E-10	5,2907E-11	5,2907E-11
94	6,4179E-11	3,209E-11	3,209E-11
95	3,8927E-11	1,9463E-11	1,9463E-11
96	2,361E-11	1,1805E-11	1,1805E-11
97	1,432E-11	7,1601E-12	7,1601E-12
98	8,6857E-12	4,3428E-12	4,3428E-12
99	5,2681E-12	2,6341E-12	2,6341E-12
100	3,1953E-12	1,5976E-12	1,5976E-12
101	1,938E-12	9,6902E-13	9,6902E-13
102	1,1755E-12	5,8774E-13	5,8774E-13
103	7,1296E-13	3,5648E-13	3,5648E-13
104	4,3244E-13	2,1622E-13	2,1622E-13
105	2,6229E-13	1,3114E-13	1,3114E-13
106	1,5908E-13	7,9542E-14	7,9542E-14
107	9,6489E-14	4,8245E-14	4,8245E-14
108	5,8524E-14	2,9262E-14	2,9262E-14
109	3,5496E-14	1,7748E-14	1,7748E-14
110	2,153E-14	1,0765E-14	1,0765E-14
111	1,3058E-14	6,5292E-15	6,5292E-15
112	7,9203E-15	3,9602E-15	3,9602E-15
113	4,8039E-15	2,402E-15	2,402E-15
114	2,9137E-15	1,4569E-15	1,4569E-15
115	1,7673E-15	8,8363E-16	8,8363E-16
116	1,0719E-15	5,3595E-16	5,3595E-16
117	6,5014E-16	3,2507E-16	3,2507E-16
118	3,9433E-16	1,9716E-16	1,9716E-16
119	2,3917E-16	1,1959E-16	1,1959E-16
120	1,4507E-16	7,2533E-17	7,2533E-17

121	8,7987E-17	4,3993E-17	4,3993E-17
122	5,3367E-17	2,6683E-17	2,6683E-17
123	3,2369E-17	1,6184E-17	1,6184E-17
124	1,9633E-17	9,8163E-18	9,8163E-18
125	1,1908E-17	5,9539E-18	5,9539E-18
126	7,2224E-18	3,6112E-18	3,6112E-18
127	4,3806E-18	2,1903E-18	2,1903E-18
128	2,657E-18	1,3285E-18	1,3285E-18
129	1,6115E-18	8,0577E-19	8,0577E-19
130	9,7745E-19	4,8872E-19	4,8872E-19
131	5,9285E-19	2,9643E-19	2,9643E-19
132	3,5958E-19	1,7979E-19	1,7979E-19
133	2,181E-19	1,0905E-19	1,0905E-19
134	1,3228E-19	6,6141E-20	6,6141E-20
135	8,0234E-20	4,0117E-20	4,0117E-20
136	4,8664E-20	2,4332E-20	2,4332E-20
137	2,9516E-20	1,4758E-20	1,4758E-20
138	1,7903E-20	8,9513E-21	8,9513E-21
139	1,0858E-20	5,4292E-21	5,4292E-21
140	6,586E-21	3,293E-21	3,293E-21
141	3,9946E-21	1,9973E-21	1,9973E-21



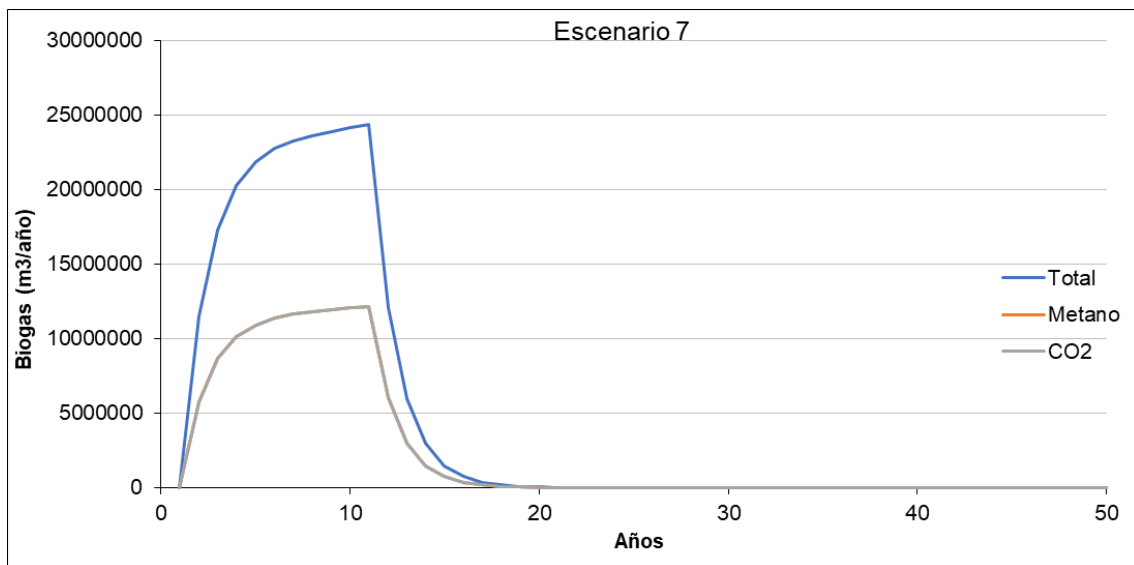
2: DETERMINE MODEL PARAMETERS		Parameters
Methane Generation Rate, k (year⁻¹) User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.		
<div>User-specified</div>	<div>User-specified value:</div>	<div>0,700</div>
Potential Methane Generation Capacity, L_o (m³/Mg) User-specified L_o value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.		
<div>User-specified</div>	<div>User-specified value:</div>	<div>60</div>
NMOC Concentration (ppmv as hexane)		
<div>CAA - 4,000</div>		
Methane Content (% by volume)		
<div>CAA - 50% by volume</div>		

Escenario 7	Total	Metano	CO ₂
1	0	0	0
2	11509619,9	5754809,96	5754809,96
3	17321036,5	8660518,27	8660518,27
4	20302808,5	10151404,3	10151404,3
5	21879420,6	10939710,3	10939710,3
6	22758251,5	11379125,8	11379125,8
7	23290573,9	11645287	11645287
8	23650825,3	11825412,7	11825412,7
9	23925629,4	11962814,7	11962814,7
10	24158001	12079000,5	12079000,5
11	24369301,2	12184650,6	12184650,6
12	12101436,8	6050718,42	6050718,42
13	6009395,69	3004697,85	3004697,85
14	2984177,59	1492088,79	1492088,79
15	1481898,73	740949,366	740949,366
16	735889,132	367944,566	367944,566
17	365431,728	182715,864	182715,864
18	181468,026	90734,0129	90734,0129
19	90114,3548	45057,1774	45057,1774
20	44749,4642	22374,7321	22374,7321
21	22221,9263	11110,9631	11110,9631
22	11035,082	5517,54101	5517,54101
23	5479,85956	2739,92978	2739,92978
24	2721,21772	1360,60886	1360,60886
25	1351,31673	675,658365	675,658365
26	671,044029	335,522014	335,522014
27	333,230603	166,615301	166,615301
28	165,47742	82,7387101	82,7387101
29	82,1736549	41,0868275	41,0868275
30	40,8062294	20,4031147	20,4031147

31	20,2637738	10,1318869	10,1318869
32	10,0626923	5,03134614	5,03134614
33	4,9969851	2,49849255	2,49849255
34	2,48142937	1,24071468	1,24071468
35	1,23224136	0,61612068	0,61612068
36	0,61191295	0,30595647	0,30595647
37	0,30386698	0,15193349	0,15193349
38	0,15089588	0,07544794	0,07544794
39	0,07493267	0,03746634	0,03746634
40	0,03721046	0,01860523	0,01860523
41	0,01847817	0,00923908	0,00923908
42	0,00917599	0,00458799	0,00458799
43	0,00455666	0,00227833	0,00227833
44	0,00226277	0,00113139	0,00113139
45	0,00112366	0,00056183	0,00056183
46	0,00055799	0,000279	0,000279
47	0,00027709	0,00013855	0,00013855
48	0,0001376	6,88E-05	6,88E-05
49	6,833E-05	3,4165E-05	3,4165E-05
50	3,3932E-05	1,6966E-05	1,6966E-05
51	1,685E-05	8,425E-06	8,425E-06
52	8,3674E-06	4,1837E-06	4,1837E-06
53	4,1551E-06	2,0776E-06	2,0776E-06
54	2,0634E-06	1,0317E-06	1,0317E-06
55	1,0246E-06	5,1232E-07	5,1232E-07
56	5,0882E-07	2,5441E-07	2,5441E-07
57	2,5267E-07	1,2634E-07	1,2634E-07
58	1,2547E-07	6,2737E-08	6,2737E-08
59	6,2309E-08	3,1154E-08	3,1154E-08
60	3,0942E-08	1,5471E-08	1,5471E-08
61	1,5365E-08	7,6826E-09	7,6826E-09
62	7,6301E-09	3,815E-09	3,815E-09
63	3,789E-09	1,8945E-09	1,8945E-09
64	1,8816E-09	9,4078E-10	9,4078E-10
65	9,3435E-10	4,6718E-10	4,6718E-10
66	4,6399E-10	2,3199E-10	2,3199E-10
67	2,3041E-10	1,152E-10	1,152E-10
68	1,1442E-10	5,7209E-11	5,7209E-11
69	5,6818E-11	2,8409E-11	2,8409E-11
70	2,8215E-11	1,4108E-11	1,4108E-11
71	1,4011E-11	7,0056E-12	7,0056E-12
72	6,9577E-12	3,4789E-12	3,4789E-12
73	3,4551E-12	1,7276E-12	1,7276E-12
74	1,7158E-12	8,5788E-13	8,5788E-13
75	8,5202E-13	4,2601E-13	4,2601E-13

76	4,231E-13	2,1155E-13	2,1155E-13
77	2,1011E-13	1,0505E-13	1,0505E-13
78	1,0434E-13	5,2168E-14	5,2168E-14
79	5,1811E-14	2,5906E-14	2,5906E-14
80	2,5729E-14	1,2864E-14	1,2864E-14
81	1,2777E-14	6,3883E-15	6,3883E-15
82	6,3446E-15	3,1723E-15	3,1723E-15
83	3,1507E-15	1,5753E-15	1,5753E-15
84	1,5646E-15	7,8229E-16	7,8229E-16
85	7,7694E-16	3,8847E-16	3,8847E-16
86	3,8582E-16	1,9291E-16	1,9291E-16
87	1,9159E-16	9,5796E-17	9,5796E-17
88	9,5142E-17	4,7571E-17	4,7571E-17
89	4,7246E-17	2,3623E-17	2,3623E-17
90	2,3462E-17	1,1731E-17	1,1731E-17
91	1,1651E-17	5,8254E-18	5,8254E-18
92	5,7856E-18	2,8928E-18	2,8928E-18
93	2,873E-18	1,4365E-18	1,4365E-18
94	1,4267E-18	7,1335E-19	7,1335E-19
95	7,0848E-19	3,5424E-19	3,5424E-19
96	3,5182E-19	1,7591E-19	1,7591E-19
97	1,7471E-19	8,7354E-20	8,7354E-20
98	8,6758E-20	4,3379E-20	4,3379E-20
99	4,3083E-20	2,1541E-20	2,1541E-20
100	2,1394E-20	1,0697E-20	1,0697E-20
101	1,0624E-20	5,312E-21	5,312E-21
102	5,2758E-21	2,6379E-21	2,6379E-21
103	2,6199E-21	1,3099E-21	1,3099E-21
104	1,301E-21	6,5049E-22	6,5049E-22
105	6,4605E-22	3,2303E-22	3,2303E-22
106	3,2082E-22	1,6041E-22	1,6041E-22
107	1,5931E-22	7,9657E-23	7,9657E-23
108	7,9113E-23	3,9556E-23	3,9556E-23
109	3,9286E-23	1,9643E-23	1,9643E-23
110	1,9509E-23	9,7545E-24	9,7545E-24
111	9,6879E-24	4,8439E-24	4,8439E-24
112	4,8109E-24	2,4054E-24	2,4054E-24
113	2,389E-24	1,1945E-24	1,1945E-24
114	1,1863E-24	5,9317E-25	5,9317E-25
115	5,8912E-25	2,9456E-25	2,9456E-25
116	2,9255E-25	1,4627E-25	1,4627E-25
117	1,4528E-25	7,2638E-26	7,2638E-26
118	7,2142E-26	3,6071E-26	3,6071E-26
119	3,5825E-26	1,7912E-26	1,7912E-26
120	1,779E-26	8,895E-27	8,895E-27

121	8,8342E-27	4,4171E-27	4,4171E-27
122	4,3869E-27	2,1935E-27	2,1935E-27
123	2,1785E-27	1,0892E-27	1,0892E-27
124	1,0818E-27	5,409E-28	5,409E-28
125	5,3721E-28	2,686E-28	2,686E-28
126	2,6677E-28	1,3339E-28	1,3339E-28
127	1,3247E-28	6,6237E-29	6,6237E-29
128	6,5785E-29	3,2892E-29	3,2892E-29
129	3,2668E-29	1,6334E-29	1,6334E-29
130	1,6222E-29	8,1112E-30	8,1112E-30
131	8,0558E-30	4,0279E-30	4,0279E-30
132	4,0004E-30	2,0002E-30	2,0002E-30
133	1,9865E-30	9,9326E-31	9,9326E-31
134	9,8648E-31	4,9324E-31	4,9324E-31
135	4,8987E-31	2,4494E-31	2,4494E-31
136	2,4326E-31	1,2163E-31	1,2163E-31
137	1,208E-31	6,04E-32	6,04E-32
138	5,9988E-32	2,9994E-32	2,9994E-32
139	2,9789E-32	1,4895E-32	1,4895E-32
140	1,4793E-32	7,3964E-33	7,3964E-33
141	7,3459E-33	3,673E-33	3,673E-33



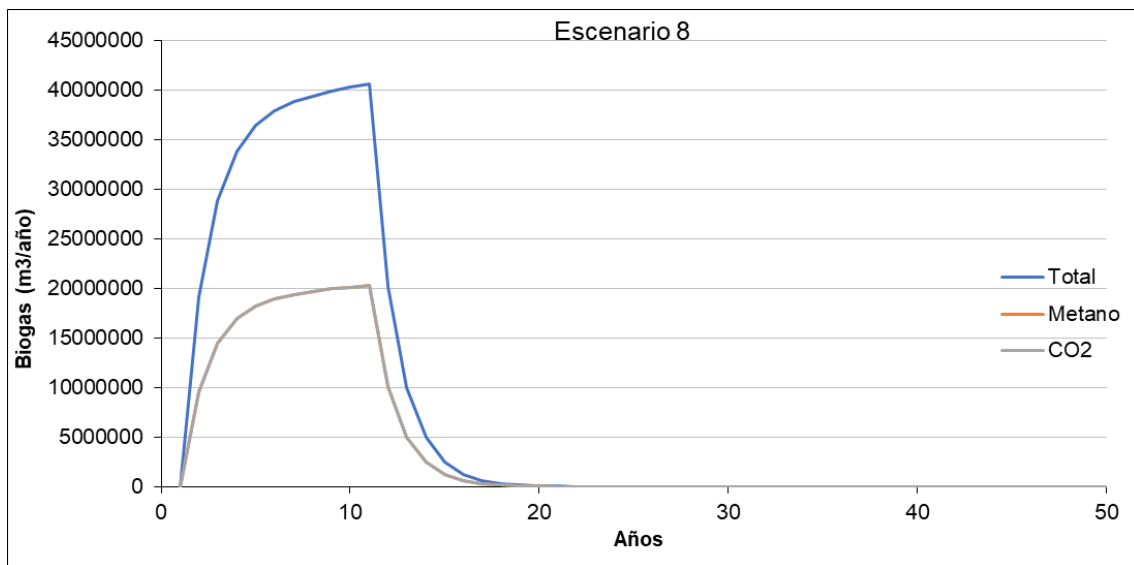
2: DETERMINE MODEL PARAMETERS		Parameters
Methane Generation Rate, k (year⁻¹) User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.		
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">User-specified</div>	User-specified value: <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 100px; text-align: center;">0,700</div>	
Potential Methane Generation Capacity, L_o (m³/Mg) User-specified Lo value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.		
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">User-specified</div>	User-specified value: <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 100px; text-align: center;">100</div>	
NMOC Concentration (ppmv as hexane)		
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">CAA - 4,000</div>		
Methane Content (% by volume)		
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">CAA - 50% by volume</div>		

Escenario 8	Total	Metano	CO ₂
1	0	0	0
2	19182699,9	9591349,93	9591349,93
3	28868394,2	14434197,1	14434197,1
4	33838014,2	16919007,1	16919007,1
5	36465701	18232850,5	18232850,5
6	37930419,2	18965209,6	18965209,6
7	38817623,2	19408811,6	19408811,6
8	39418042,2	19709021,1	19709021,1
9	39876049	19938024,5	19938024,5
10	40263335	20131667,5	20131667,5
11	40615502	20307751	20307751
12	20169061,4	10084530,7	10084530,7
13	10015659,5	5007829,74	5007829,74
14	4973629,31	2486814,65	2486814,65
15	2469831,22	1234915,61	1234915,61
16	1226481,89	613240,944	613240,944
17	609052,881	304526,44	304526,44
18	302446,71	151223,355	151223,355
19	150190,591	75095,2956	75095,2956
20	74582,4404	37291,2202	37291,2202
21	37036,5438	18518,2719	18518,2719
22	18391,8034	9195,90168	9195,90168
23	9133,09926	4566,54963	4566,54963
24	4535,36287	2267,68144	2267,68144
25	2252,19455	1126,09727	1126,09727
26	1118,40671	559,203357	559,203357
27	555,384338	277,692169	277,692169
28	275,7957	137,89785	137,89785
29	136,956092	68,4780458	68,4780458
30	68,0103823	34,0051912	34,0051912

31	33,7729564	16,8864782	16,8864782
32	16,7711538	8,3855769	8,3855769
33	8,3283085	4,16415425	4,16415425
34	4,13571561	2,0678578	2,0678578
35	2,05373559	1,0268678	1,0268678
36	1,01985491	0,50992746	0,50992746
37	0,50644496	0,25322248	0,25322248
38	0,25149313	0,12574656	0,12574656
39	0,12488779	0,06244389	0,06244389
40	0,06201744	0,03100872	0,03100872
41	0,03079695	0,01539847	0,01539847
42	0,01529331	0,00764666	0,00764666
43	0,00759443	0,00379722	0,00379722
44	0,00377128	0,00188564	0,00188564
45	0,00187276	0,00093638	0,00093638
46	0,00092999	0,00046499	0,00046499
47	0,00046182	0,00023091	0,00023091
48	0,00022933	0,00011467	0,00011467
49	0,00011388	5,6941E-05	5,6941E-05
50	5,6553E-05	2,8276E-05	2,8276E-05
51	2,8083E-05	1,4042E-05	1,4042E-05
52	1,3946E-05	6,9728E-06	6,9728E-06
53	6,9252E-06	3,4626E-06	3,4626E-06
54	3,439E-06	1,7195E-06	1,7195E-06
55	1,7077E-06	8,5387E-07	8,5387E-07
56	8,4804E-07	4,2402E-07	4,2402E-07
57	4,2112E-07	2,1056E-07	2,1056E-07
58	2,0912E-07	1,0456E-07	1,0456E-07
59	1,0385E-07	5,1924E-08	5,1924E-08
60	5,1569E-08	2,5785E-08	2,5785E-08
61	2,5609E-08	1,2804E-08	1,2804E-08
62	1,2717E-08	6,3584E-09	6,3584E-09
63	6,315E-09	3,1575E-09	3,1575E-09
64	3,1359E-09	1,568E-09	1,568E-09
65	1,5573E-09	7,7863E-10	7,7863E-10
66	7,7331E-10	3,8666E-10	3,8666E-10
67	3,8401E-10	1,9201E-10	1,9201E-10
68	1,907E-10	9,5348E-11	9,5348E-11
69	9,4697E-11	4,7348E-11	4,7348E-11
70	4,7025E-11	2,3513E-11	2,3513E-11
71	2,3352E-11	1,1676E-11	1,1676E-11
72	1,1596E-11	5,7981E-12	5,7981E-12
73	5,7585E-12	2,8793E-12	2,8793E-12
74	2,8596E-12	1,4298E-12	1,4298E-12
75	1,42E-12	7,1002E-13	7,1002E-13

76	7,0517E-13	3,5258E-13	3,5258E-13
77	3,5018E-13	1,7509E-13	1,7509E-13
78	1,7389E-13	8,6946E-14	8,6946E-14
79	8,6352E-14	4,3176E-14	4,3176E-14
80	4,2881E-14	2,1441E-14	2,1441E-14
81	2,1294E-14	1,0647E-14	1,0647E-14
82	1,0574E-14	5,2872E-15	5,2872E-15
83	5,2511E-15	2,6255E-15	2,6255E-15
84	2,6076E-15	1,3038E-15	1,3038E-15
85	1,2949E-15	6,4745E-16	6,4745E-16
86	6,4303E-16	3,2152E-16	3,2152E-16
87	3,1932E-16	1,5966E-16	1,5966E-16
88	1,5857E-16	7,9285E-17	7,9285E-17
89	7,8743E-17	3,9372E-17	3,9372E-17
90	3,9103E-17	1,9551E-17	1,9551E-17
91	1,9418E-17	9,7089E-18	9,7089E-18
92	9,6426E-18	4,8213E-18	4,8213E-18
93	4,7884E-18	2,3942E-18	2,3942E-18
94	2,3778E-18	1,1889E-18	1,1889E-18
95	1,1808E-18	5,904E-19	5,904E-19
96	5,8637E-19	2,9318E-19	2,9318E-19
97	2,9118E-19	1,4559E-19	1,4559E-19
98	1,446E-19	7,2298E-20	7,2298E-20
99	7,1805E-20	3,5902E-20	3,5902E-20
100	3,5657E-20	1,7829E-20	1,7829E-20
101	1,7707E-20	8,8534E-21	8,8534E-21
102	8,7929E-21	4,3965E-21	4,3965E-21
103	4,3664E-21	2,1832E-21	2,1832E-21
104	2,1683E-21	1,0842E-21	1,0842E-21
105	1,0768E-21	5,3838E-22	5,3838E-22
106	5,347E-22	2,6735E-22	2,6735E-22
107	2,6552E-22	1,3276E-22	1,3276E-22
108	1,3185E-22	6,5927E-23	6,5927E-23
109	6,5477E-23	3,2739E-23	3,2739E-23
110	3,2515E-23	1,6258E-23	1,6258E-23
111	1,6146E-23	8,0732E-24	8,0732E-24
112	8,0181E-24	4,0091E-24	4,0091E-24
113	3,9817E-24	1,9908E-24	1,9908E-24
114	1,9772E-24	9,8862E-25	9,8862E-25
115	9,8187E-25	4,9093E-25	4,9093E-25
116	4,8758E-25	2,4379E-25	2,4379E-25
117	2,4213E-25	1,2106E-25	1,2106E-25
118	1,2024E-25	6,0118E-26	6,0118E-26
119	5,9708E-26	2,9854E-26	2,9854E-26
120	2,965E-26	1,4825E-26	1,4825E-26

121	1,4724E-26	7,3618E-27	7,3618E-27
122	7,3116E-27	3,6558E-27	3,6558E-27
123	3,6308E-27	1,8154E-27	1,8154E-27
124	1,803E-27	9,0151E-28	9,0151E-28
125	8,9535E-28	4,4767E-28	4,4767E-28
126	4,4462E-28	2,2231E-28	2,2231E-28
127	2,2079E-28	1,104E-28	1,104E-28
128	1,0964E-28	5,4821E-29	5,4821E-29
129	5,4446E-29	2,7223E-29	2,7223E-29
130	2,7037E-29	1,3519E-29	1,3519E-29
131	1,3426E-29	6,7131E-30	6,7131E-30
132	6,6673E-30	3,3336E-30	3,3336E-30
133	3,3109E-30	1,6554E-30	1,6554E-30
134	1,6441E-30	8,2207E-31	8,2207E-31
135	8,1645E-31	4,0823E-31	4,0823E-31
136	4,0544E-31	2,0272E-31	2,0272E-31
137	2,0133E-31	1,0067E-31	1,0067E-31
138	9,998E-32	4,999E-32	4,999E-32
139	4,9649E-32	2,4824E-32	2,4824E-32
140	2,4655E-32	1,2327E-32	1,2327E-32
141	1,2243E-32	6,1216E-33	6,1216E-33



2: DETERMINE MODEL PARAMETERS		Parameters
Methane Generation Rate, k (year⁻¹) User-specified k value should be based on site-specific data and determined by EPA Method 2E.		
<div>User-specified</div>	<div>User-specified value:</div>	<div>0,700</div>
Potential Methane Generation Capacity, L_o (m³/Mg) User-specified L_o value should be based on site-specific data and determined by waste type and composition.		
<div>User-specified</div>	<div>User-specified value:</div>	<div>170</div>
NMOC Concentration (ppmv as hexane)		
<div>CAA - 4,000</div>		
Methane Content (% by volume)		
<div>CAA - 50% by volume</div>		

Escenario 9	Total	Metano	CO ₂
1	0	0	0
2	32610589,8	16305294,9	16305294,9
3	49076270,2	24538135,1	24538135,1
4	57524624,2	28762312,1	28762312,1
5	61991691,7	30995845,9	30995845,9
6	64481712,6	32240856,3	32240856,3
7	65989959,5	32994979,8	32994979,8
8	67010671,8	33505335,9	33505335,9
9	67789283,4	33894641,7	33894641,7
10	68447669,5	34223834,7	34223834,7
11	69046353,4	34523176,7	34523176,7
12	34287404,4	17143702,2	17143702,2
13	17026621,1	8513310,56	8513310,56
14	8455169,83	4227584,91	4227584,91
15	4198713,08	2099356,54	2099356,54
16	2085019,21	1042509,6	1042509,6
17	1035389,9	517694,949	517694,949
18	514159,407	257079,703	257079,703
19	255324,005	127662,003	127662,003
20	126790,149	63395,0743	63395,0743
21	62962,1245	31481,0622	31481,0622
22	31266,0657	15633,0329	15633,0329
23	15526,2687	7763,13437	7763,13437
24	7710,11688	3855,05844	3855,05844
25	3828,73073	1914,36537	1914,36537
26	1901,29141	950,645707	950,645707
27	944,153375	472,076687	472,076687
28	468,85269	234,426345	234,426345
29	232,825356	116,412678	116,412678
30	115,61765	57,808825	57,808825

31	57,4140258	28,7070129	28,7070129
32	28,5109615	14,2554807	14,2554807
33	14,1581245	7,07906223	7,07906223
34	7,03071653	3,51535827	3,51535827
35	3,49135051	1,74567525	1,74567525
36	1,73375335	0,86687668	0,86687668
37	0,86095643	0,43047822	0,43047822
38	0,42753831	0,21376916	0,21376916
39	0,21230924	0,10615462	0,10615462
40	0,10542965	0,05271482	0,05271482
41	0,05235481	0,02617741	0,02617741
42	0,02599863	0,01299932	0,01299932
43	0,01291054	0,00645527	0,00645527
44	0,00641118	0,00320559	0,00320559
45	0,0031837	0,00159185	0,00159185
46	0,00158098	0,00079049	0,00079049
47	0,00078509	0,00039255	0,00039255
48	0,00038986	0,00019493	0,00019493
49	0,0001936	9,68E-05	9,68E-05
50	9,6139E-05	4,807E-05	4,807E-05
51	4,7741E-05	2,3871E-05	2,3871E-05
52	2,3708E-05	1,1854E-05	1,1854E-05
53	1,1773E-05	5,8864E-06	5,8864E-06
54	5,8462E-06	2,9231E-06	2,9231E-06
55	2,9032E-06	1,4516E-06	1,4516E-06
56	1,4417E-06	7,2083E-07	7,2083E-07
57	7,1591E-07	3,5796E-07	3,5796E-07
58	3,5551E-07	1,7776E-07	1,7776E-07
59	1,7654E-07	8,8271E-08	8,8271E-08
60	8,7668E-08	4,3834E-08	4,3834E-08
61	4,3535E-08	2,1767E-08	2,1767E-08
62	2,1619E-08	1,0809E-08	1,0809E-08
63	1,0735E-08	5,3677E-09	5,3677E-09
64	5,3311E-09	2,6655E-09	2,6655E-09
65	2,6473E-09	1,3237E-09	1,3237E-09
66	1,3146E-09	6,5731E-10	6,5731E-10
67	6,5283E-10	3,2641E-10	3,2641E-10
68	3,2418E-10	1,6209E-10	1,6209E-10
69	1,6098E-10	8,0492E-11	8,0492E-11
70	7,9943E-11	3,9971E-11	3,9971E-11
71	3,9698E-11	1,9849E-11	1,9849E-11
72	1,9714E-11	9,8568E-12	9,8568E-12
73	9,7895E-12	4,8947E-12	4,8947E-12
74	4,8613E-12	2,4307E-12	2,4307E-12
75	2,4141E-12	1,207E-12	1,207E-12

76	1,1988E-12	5,9939E-13	5,9939E-13
77	5,953E-13	2,9765E-13	2,9765E-13
78	2,9562E-13	1,4781E-13	1,4781E-13
79	1,468E-13	7,34E-14	7,34E-14
80	7,2898E-14	3,6449E-14	3,6449E-14
81	3,62E-14	1,81E-14	1,81E-14
82	1,7976E-14	8,9882E-15	8,9882E-15
83	8,9269E-15	4,4634E-15	4,4634E-15
84	4,4329E-15	2,2165E-15	2,2165E-15
85	2,2013E-15	1,1007E-15	1,1007E-15
86	1,0932E-15	5,4658E-16	5,4658E-16
87	5,4284E-16	2,7142E-16	2,7142E-16
88	2,6957E-16	1,3478E-16	1,3478E-16
89	1,3386E-16	6,6932E-17	6,6932E-17
90	6,6475E-17	3,3237E-17	3,3237E-17
91	3,301E-17	1,6505E-17	1,6505E-17
92	1,6392E-17	8,1962E-18	8,1962E-18
93	8,1402E-18	4,0701E-18	4,0701E-18
94	4,0423E-18	2,0212E-18	2,0212E-18
95	2,0074E-18	1,0037E-18	1,0037E-18
96	9,9683E-19	4,9841E-19	4,9841E-19
97	4,9501E-19	2,475E-19	2,475E-19
98	2,4581E-19	1,2291E-19	1,2291E-19
99	1,2207E-19	6,1034E-20	6,1034E-20
100	6,0617E-20	3,0309E-20	3,0309E-20
101	3,0102E-20	1,5051E-20	1,5051E-20
102	1,4948E-20	7,474E-21	7,474E-21
103	7,4229E-21	3,7115E-21	3,7115E-21
104	3,6861E-21	1,8431E-21	1,8431E-21
105	1,8305E-21	9,1524E-22	9,1524E-22
106	9,0899E-22	4,5449E-22	4,5449E-22
107	4,5139E-22	2,2569E-22	2,2569E-22
108	2,2415E-22	1,1208E-22	1,1208E-22
109	1,1131E-22	5,5656E-23	5,5656E-23
110	5,5276E-23	2,7638E-23	2,7638E-23
111	2,7449E-23	1,3725E-23	1,3725E-23
112	1,3631E-23	6,8154E-24	6,8154E-24
113	6,7688E-24	3,3844E-24	3,3844E-24
114	3,3613E-24	1,6807E-24	1,6807E-24
115	1,6692E-24	8,3459E-25	8,3459E-25
116	8,2889E-25	4,1444E-25	4,1444E-25
117	4,1161E-25	2,0581E-25	2,0581E-25
118	2,044E-25	1,022E-25	1,022E-25
119	1,015E-25	5,0751E-26	5,0751E-26
120	5,0405E-26	2,5202E-26	2,5202E-26

121	2,503E-26	1,2515E-26	1,2515E-26
122	1,243E-26	6,2148E-27	6,2148E-27
123	6,1724E-27	3,0862E-27	3,0862E-27
124	3,0651E-27	1,5326E-27	1,5326E-27
125	1,5221E-27	7,6105E-28	7,6105E-28
126	7,5585E-28	3,7792E-28	3,7792E-28
127	3,7534E-28	1,8767E-28	1,8767E-28
128	1,8639E-28	9,3195E-29	9,3195E-29
129	9,2559E-29	4,6279E-29	4,6279E-29
130	4,5963E-29	2,2982E-29	2,2982E-29
131	2,2825E-29	1,1412E-29	1,1412E-29
132	1,1334E-29	5,6672E-30	5,6672E-30
133	5,6285E-30	2,8142E-30	2,8142E-30
134	2,795E-30	1,3975E-30	1,3975E-30
135	1,388E-30	6,9398E-31	6,9398E-31
136	6,8924E-31	3,4462E-31	3,4462E-31
137	3,4227E-31	1,7113E-31	1,7113E-31
138	1,6997E-31	8,4983E-32	8,4983E-32
139	8,4402E-32	4,2201E-32	4,2201E-32
140	4,1913E-32	2,0957E-32	2,0957E-32
141	2,0813E-32	1,0407E-32	1,0407E-32

